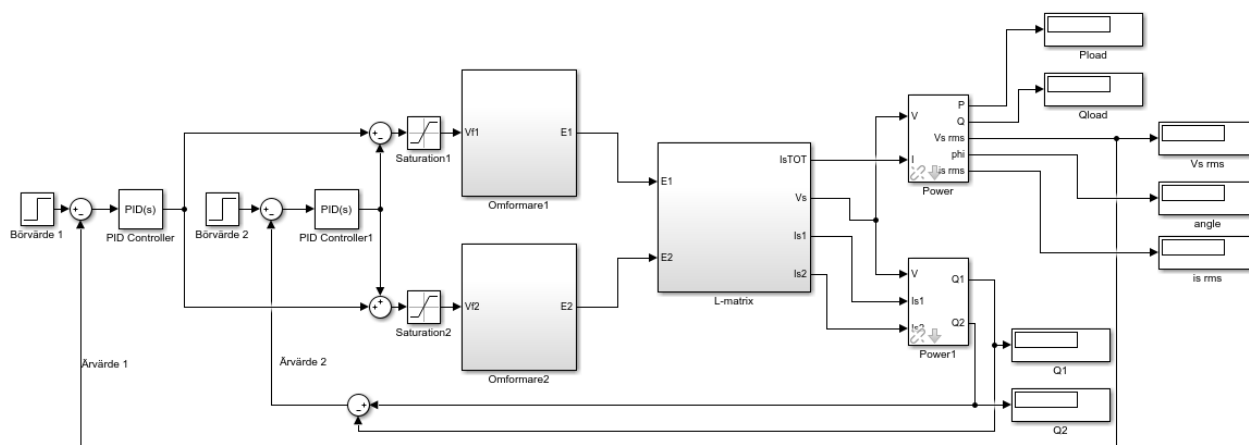




CHALMERS



Lastdelningsystem för parallellkopplade synkrogeneratorer

Kandidatarbete inom elektroteknik

Axel Book & Karl Lagerljung

EXAMENSARBETE

Lastdelningssystem för parallellkopplade synkrongeneratorer

KARL LAGERLJUNG
AXEL BOOK

Examensarbete No: EX061/2017
Institutionen för Material & Tillverkningsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg

Utfört vid

IETV AB
Gällstad

Handledare

Lars Christoffersson
IETV AB

Thomas Hammarström
Chalmers Tekniska Högskola

Examinator

Thomas Hammarström
Institutionen för Material och
Tillverkningsteknik

Lastdelningssystem för parallellkopplade synkrongeneratorer

© KARL LAGERLJUNG & AXEL BOOK, 2017

Institutionen för Material & Tillverkningsteknik

Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46 (0)31-772 1000

Omslag

Bild tagen av egenkonstruerat system i Simulink.

Förord

Detta examensarbete är utfört vid institutionen för Material- och tillverkningsteknik på Chalmers tekniska högskola under vårterminen 2017. Arbetet omfattar 15 högskolepoäng och är det avslutande momentet på högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik. Uppdragsgivaren för projektet är teknikföretaget IETV.

Vi vill rikta tack till alla personer som har varit behjälpliga i processen med att färdigställa detta projekt. Vår handledare Thomas Hammarström på institutionen för Material- och tillverkningsteknik. Lars Christoffersson, Malin Fridmar och Fredrik Larsson på IETV. Vi vill även tacka Stefan Lundberg på Chalmers för hjälp med att utveckla simuleringsmodellerna för synkrongeneratorerna.

Göteborg, 2017

Karl Lagerljung

Axel Book

Sammanfattning

Detta arbete syftar till att konstruera ett lastdelningssystem samt en spänningsregulator för två roterande omformare i paralleldrift vilka används i det svenska järnvägsnätet. För detta ändamål har en simuleringsmodell utvecklats i Simulink i vilken funktionen kan utvärderas. Målet är att fördela den reaktiva effekten lika mellan de ingående omformarna samt att reglera klämspänningen ut från omformarna till ett önskat börvärde. Slutprodukten utvärderades sedan genom att olika laster anslöts till omformarna och störningar fördes in för att se huruvida en korrekt lastdelning samt klämspänning erhöles. De laster som användes var ett tåg, vilket modellerades som en rent resistiv last, samt en ledning av induktivkaraktär, vilket modellerades som en komplex impedans, vars längd kunde ändras för att representera ett tåg på olika avstånd från en omformarstation. Systemet utvärderades genom tester vid tre olika lastfall både med och utan störningar. I samtliga fall utfördes en korrekt lastdelning och spänningsnivån hölls på ett önskat värde. Dock klarade systemet inte av att öka den totala effektproduktionen vilket ledde till att för lite effekt förseddes vid stora laster. Problem uppstod också när omformarna skulle drivas undermagnetiserade, något som istället representerades med att störningar fördes in.

Abstract

This thesis aims at designing a system for load sharing and voltage regulation for rotating frequency converter used in the Swedish railway system. In order to make this a simulation model has been created in Simulink whereas the function can be evaluated. The goal is to divide the reactive power equally between the two converters and to regulate the output voltage to a fixed value. The finished product was then evaluated through the connection of different loads which were subjugated to faults to test the function of the system. The loads that were used were a train modelled as a purely resistive load and a transmission line modelled as a complex impedance. The length of the transmission line could then be altered, representing a train moving away from the station. The system was evaluated at three different load scenarios both with and without faults. At all the tested scenarios a successful load sharing and correct voltage levels were achieved. The system is however not designed to increase the production of supplied power which lead to a too low production of power when big loads were connected. Problems also occurred when trying to run the converters under magnetized which instead was symbolized by applying faults.

Innehåll

Förkortningar.....	1
1 Inledning.....	2
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte	2
1.3 Precisering av frågeställningen	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Svenska järnvägens elförsörjning.....	3
2.1.1 Omformarstationer	4
2.1.2 Roterande omformare.....	4
2.1.3 Statiska omriktare.....	6
2.2 Synkronmaskinen	6
2.2.1 Utformning	7
2.2.2 Funktion	7
2.3 Reglerprinciper.....	12
3 Metod 3.1 Beräkningar av parametrar.....	14
3.1.1 Tomgångsberäkningar	14
3.1.2 Märklasterberäkningar.....	15
3.2 Parametrar för last	15
3.2.1 Parametrar för matarledning.....	16
3.2.2 Parametrar för tåg.....	17
3.3 Modellering i Simulink	17
3.3.1 Modellering av Q38/Q39	17
3.3.2 Modellering av parallellkopplade roterande omformare.....	20
3.4 Reglersystemet	23
4. Resultat.....	23
4.1 Fall 1, 1 km ledning fel pålagt i V_s och i_s	23
4.1.1 Fall 1 utan pålagda fel	23
4.1.2 Fall 1 med pålagda störningar	25
4.2 Fall 2, 20 km ledning V_s -error och i_s -error och med olika parametrar på omformarna .	26
4.2.1 Fall 2 utan pålagda störningar	26
.....	27
4.2.2 Fall 2 olika storlekar för de två omformarna.....	28
4.2.3 Fall 2 med pålagda störningar	29

4.3 Fall 3, 40 km ledning, fel pålagda i V_s och i_s	30
4.3.1 Fall 3 utan pålagda störningar	30
4.3.2 Fall 3 med pålagda störningar	31
5. Diskussion	32
5.1 Simuleringsmodell	33
5.2 Lastdelning	33
5.3 Skenspanning	34
5.4 Framtida utveckling av arbetet	34
Referenser.....	35

Förkortningar

MVA – Mega Volt Ampere

Hz – Hertz

kV – Kilo volt

A – Ampere

K_m – Motorkonstant för synkrongenerator

ω – Vinkelfrekvens, rad/sek

E – Inducerad spänning i statorkretsen av synkrongeneratoren

P – Aktiv effekt

Q – Reaktiv effekt

T – Vridmoment

R_f – Resistans i fältkretsen

L_f – Induktans i fältkretsen

R_s – Resistans i statorkretsen

L_s – Induktans i statorkretsen

R_l – Resistans i kontaktledningen

L_l – Induktans i kontaktledningen

R_{train} – Resistans för tåg

i_s – Statorström

i_f – Fältström

V_s – Skenspänning ut från synkrongeneratoren

V_f – Fältspänning

F_r – Magnetiska fältstyrkan i rotor vid pålagd spänning

F_s – Magnetiska inducerade fältstyrkan i statorn

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Då det svenska järnvägsnätet drivs av en annan frekvens än stamnätet behöver el överförd från stamnätet frekvensomvandlas vid överföring till järnvägsnätet. Detta sker genom så kallade omformarstationer. En stor del av dessa innehåller roterande omformare vilka använder sig av synkronmaskiner för att utföra frekvensomvandlingen. Dessa synkronmaskiner har varit i drift sedan 1970-talet eller ännu tidigare och processen med att uppdatera driften genom integrering av modern teknik pågår ständigt. Detta arbete är en del av denna process.

IETV är ett företag som arbetar med elkraftsrelaterade uppdrag inom järnväg, vattenkraft, industri och vindkraft för att nämna några områden. Företaget tillhandahåller samt underhåller utrustning för elförsörjningen av järnväg både i Sveriges och Norge på uppdrag av Trafikverket respektive BaneNOR (f.d. Jernbaneverket). IETV har tidigare utfört arbete på Trafikverkets omformarstation i Varberg och detta examensarbete kan ses som en fortsättning där en lösning för att förbättra driften hos roterande omformare i omformarstationer skall tas fram.

1.2 Syfte

Uppdragets inledande fas består av att bygga en simuleringsmodell av roterande omformare. Utifrån resultaten av simuleringarna skall sedan ett reglersystem konstrueras vilket kommer att ha dimensionerade ingångs och utgångsparametrar. Målet är att fördela den reaktiva effekten lika mellan de ingående aggregaten. Systemet för lastdelning skall beräkna börvärden för regulatorerna som styr magnetiseringen till parallellt kopplade synkrogeneratorer. Resultatet skall förhindra att strömmar cirkulerar mellan aggregaten, hålla skenspanningen konstant samt skapa en jämn lastdelning. Slutprodukten består av en regleralgoritm som ska kunna implementeras i universell programvara. Dess funktion är verifierad i Simulink och implementationen redovisas i denna rapport.

1.3 Precisering av frågeställningen

- Ta fram en simuleringsmodell för två roterande omformare i Simulink.
- Utveckla en regulator för styrning av skenspanning samt en regulator för styrning av lastdelning.
- Testa den framtagna regulatorn genom olika fallstudier.

1.4 Avgränsningar

- Behandlar endast lastdelning mellan två roterande omformare.
- Storleken av producerad skenbar effekt styrs ej utan endast hur den reaktiva effekten fördelas mellan två roterande omformare.
- Möjliga fel i systemet begränsas till fel i skenspanning samt fel i fältströmmar.
- Framtagna parametrar för roterande omformare utgår från mätdata hämtad från roterande omformare av modell Q38/39[6].

- Ingen transformering av spänning och ström. Klämspänningen och klämströmmen på generatorsidan av de roterande omformarna används.

2 Teori

2.1 Svenska järnvägens elförsörjning

Det svenska järnvägsnätet utgörs av drygt 16500 kilometer järnvägsspår varav huvuddelen, cirka 80%, utgörs av elektrifierad järnväg[1]. Trafikverket, vilket driver den svenska järnvägen, köper el från svenska kraftbolag vilken därefter matas till tågen via främst luftburna kontaktledningar. Den elektriska effekten hämtas från elnätet vid 132 kV(50 Hz) och leds till tågen transformerad till 15 kV(16,2/3 Hz). För att göra denna omvandling krävs omformarstationer för att omvandla frekvensen samt transformatoranläggningar för att omvandla spänningsnivån. Den svenska järnvägen använder nämligen likt, Norge, Tyskland, Österrike och Schweiz sig av just enfas växelspanning vid ovan nämnda frekvens.

Den svenska järnvägen elektrifierades tidigt då det fanns nationella intressen i att minska beroendet av importerat kol vilket behövdes vid drift av ångdrivna tåg vid denna tid och istället satsa på inhemskt producerad energi via vattenkraft. Flera mindre sträckor elektrifierades redan under slutet av 1800-talet och i början av 1900-talet. Den statliga elektrifieringen av malmbanan Kiruna-Riksgränsen blev också startskottet till en nationell elektrifiering av järnvägen[2].

I början av denna elektrifieringsprocess utvärderades olika system för att finna det som var mest lämpligt för järnvägsapplikationen. Tidiga privata banor använde sig av likström vid 750 V. Problem med spänningsfall uppkom då dessvärre vid längre linjer, vilket ledde till att likriktare var tvungna att installeras med endast några få kilometers mellanrum vilket skapade höga kostnader. Trefassystem utvärderades också men detta ledde till allt för höga kostnader då fler kontaktledningar behövde användas samt att det behövdes, för denna tid, avancerade utväxlingsanordningar i loken för att styra hastigheten. Valet föll därför på ett enfasystem där en lägre frekvens användes vilket var bättre lämpat för den typ av synkronmotorer som kunde tillverkas vid denna tid. Ytterligare en fördel var att en hög överföringsspänning kunde användas vilken transformeras i loken för att få rätt spänningsnivå. Frekvenserna som användes var kvoter av 50 Hz vilket var den spänning som användes på stamnätet, 25 och 16,2/3 Hz användes vilket är hälften respektive en tredjedel av stamnätets frekvens. Den senare frekvensnivån används alltjämt [3].

Omformarstationer används för att omvandla frekvensen hos matarspänningen. Omformarstationerna kan innehålla två olika former av frekvensomvandlare, statiska omriktare och roterande omformare. Dessa presenteras närmare i avsnitt 2.1.1.

Svenska järnvägen är dimensionerad för tåg som drivs av 15 kV + 10% och - 20% toleransnivå. Lämplig spänningsnivå nås genom att matningen till tågens kontaktledningar sker via transformatorer som nämnts ovan. Kontaktledningarna förser effekt till tågen genom deras strömavtagare som ligger an mot kontaktledningen. Kontaktledningen ligger i sick sack form över tågen för att få ett så jämnt slitage som möjligt på ledningen. Ledningen hålls spänd i sektioner om 1,2 kilometer detta för att ledningen ska ligga på en jämn nivå över tågen för

att tillåta dessa så höga hastigheter som möjligt. Strömmen återleds via rälsen och vissa oundvikliga förluster skapas då i jordströmmar. Återledningen är kopplad via en sugtransformator som driver tillbaka returströmmen i återledningen, detta för att undvika störningar i tele- och signalledningar som finns intill tågledningarna. Järnvägen förses även med effekt från stamnätet genom hjälpkraftsledningar vilka förser el till signaler, växelvärmare samt stationsbyggnader [4].

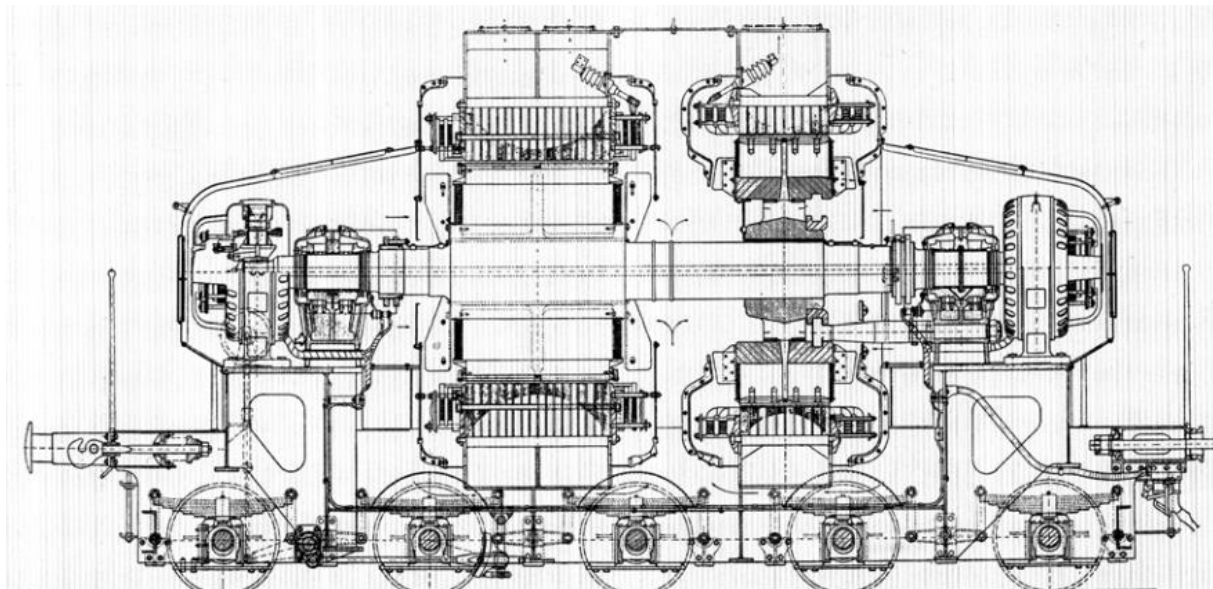
2.1.1 Omformarstationer

Här följer en mer ingående beskrivning av omformarstationerna med fokus på roterande omformare vilka används i detta projekt, även statiska omriktare beskrivs i korthet.

I Sverige fanns år 2013 46 omformarstationer med 2-6 roterande omformare eller statiska omriktare placerade i varje, totala installerade kapaciteten var då 1429 MVA. Den installerade effekten var vid denna tid under utbyggnad då omformarstationerna placerade i Stockholm, Göteborg och Malmö användes över den rekommenderade kapaciteten. Även de södra delarna av tågnätet var i behov av ökad kraftförsörjning [9].

2.1.2 Roterande omformare

De roterande omformarna består av två synkronmaskiner vilka är ihopkopplade på en gemensam axel. En synkronmaskin går i motordrift och drivs av det vanliga elnätet, 132 kV, 50 Hz. Denna motor överför kraft till den andra synkronmaskinen vilken går i generatordrift och matar el till järnvägen (15 kV, 16,2/3 Hz). Frekvensomvandlingen sker genom att de två synkronmaskinerna har olika mängd polpar, motorn har 12 polpar och generatoren har 4 polpar. Kvoten mellan maskinerna blir då 3/1 och frekvensen sänks med samma förhållande. Då de roterande omformarna är placerade på tågagnar kan de förflyttas via tågnätet. Att de är förflyttningsbara är fördelaktigt vid reparationsarbete och möjliggör också att omformarna kan flyttas mellan omformarstationer vid behov. Ytterligare en orsak är att det i krigstid ses som en fördel att kunna flytta omformarna [4].



Figur 1 Genomsnittsbild av roterande omformare[11]

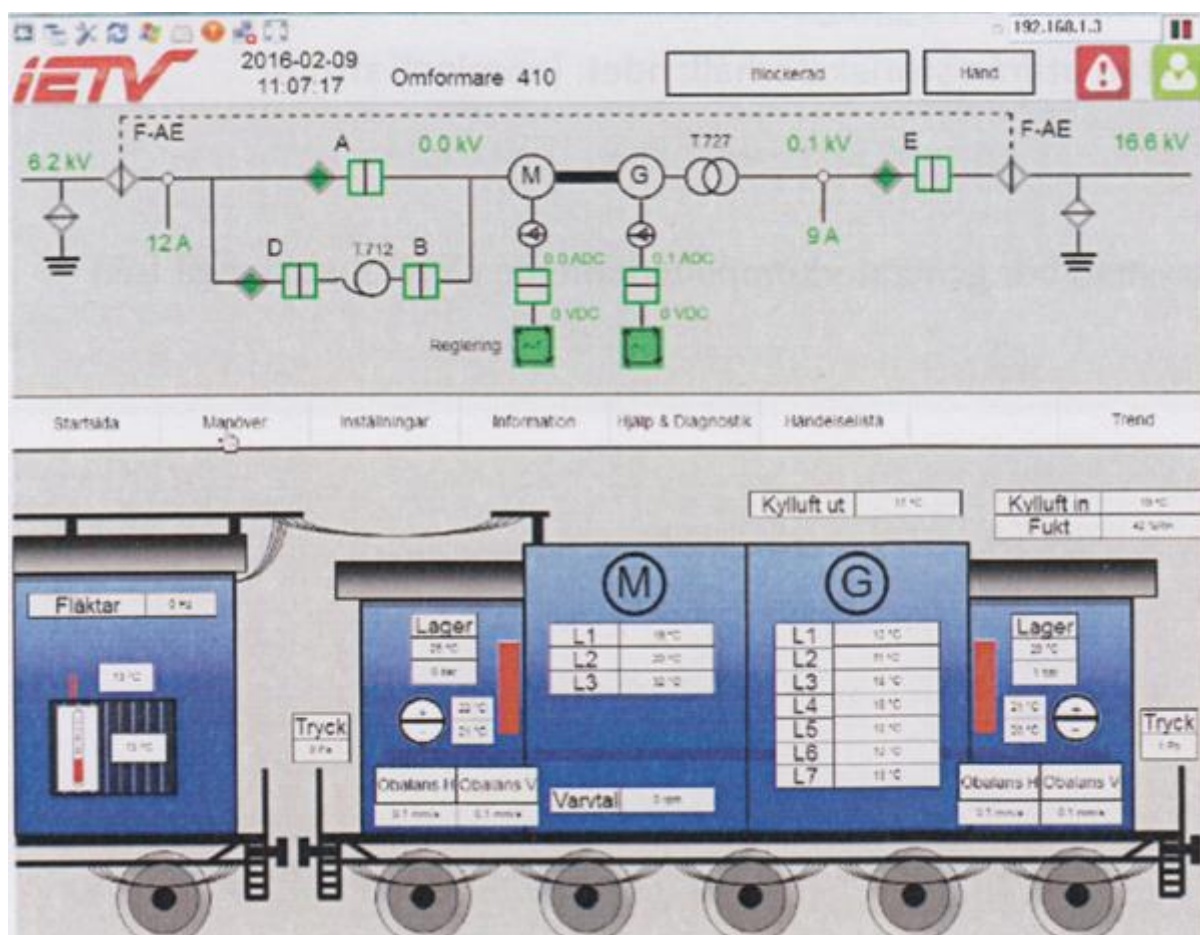
De roterande omformarna har vissa fördelar gentemot de statiska omriktarna. För det första så avskiljer de roterande omformarna det matande nätet från nätet som matas och överför därför inte störningar mellan nätet. För det andra kan synkronmaskiner producera samt konsumera reaktiveffekt vilket används för att kompensera spänningsfall. För det tredje gör den stora massan hos de roterande delarna i omformarna att plötsliga förändringar i belastning inte påverkar matningen direkt. De roterande omformarna är även mycket robusta och driftsäkerheten är hög. Transienta störningar på ledningarna har även de liten påverkan på de roterande omformarna [5].

Nackdelarna hos de roterande omformarna är att verkningsgraden inte är lika hög som hos de statiska omformarna, 88 % jämfört med 94 %. Kontinuerligt underhållsarbete måste även utföras då synkronmaskinerna med tiden påverkas av mekaniskt slitage i de roterande delarna [5].

De roterande omformarna finns i tre olika storlekar med maximala effekter på 3.2 KVA (Q24/Q25), 5.8 KVA (Q38/Q39) samt 10 KVA (Q48/Q49). De roterande omformarna har olika utspänningar och utströmmar beroende på storlek och dessa transformeras upp respektive ner innan de matas ut till kontaktledningsnätet för att där nå en nätspänning på 15 kV + 10 %, - 20 %. Som exempel kan Q38/Q39 tas vilken har en klämspänning på 4000 V och en klämström på 1000 A. Spänningen transformeras sedan upp till 16.5 kV (15 kV + 10 %) och strömmen transformeras ner till 241 A för att få den önskade utspänningen [6].

Då flera omformare står i en gemensam omformarstation behövs det styrsystem för att styra fördelningen av kraft mellan de olika omformarna. Detta sker bland annat via kontrollsystem som i realtid reglerar matningen av fältspänning till de olika ingående omformarna för att styra produktionen av reaktiv effekt. Omformarna skyddas även av överströmsskydd samt annan skyddsutrustning för att begränsa skadeverkningarna vid fel [7].

Det nuvarande kontrollsystemet utvecklat av IETV för en omformare kan ses ur figur 2 nedan. Där framgår mätning av olika värden för styrning och övervakning av systemet.



Figur 2 Kontrollsystem för roterande omformare[12]

2.1.3 Statiska omriktare

Den andra metoden för frekvensomvandling av elen från kraftnätet är att använda statiska omriktare, dessa bygger på kraftelektronik uppbyggda av tyristorer.

Fördelarna med de statiska omriktarna är att de har högre verkningsgrad och är snabbare än de roterande omformarna vid uppstart och avstängning[7]. Detta då synkronmaskinerna har ett tröghetsmoment i sina roterande delar. De statiska omriktarna kräver heller inte underhåll i samma utsträckning som de roterande omformarna då de saknar roterande mekaniska delar. Nackdelarna är att de är känsliga för överbelastningar och därför måste dimensioneras för maximal belastning medan de roterande omformarna klarar flera minuters överbelastning [5].

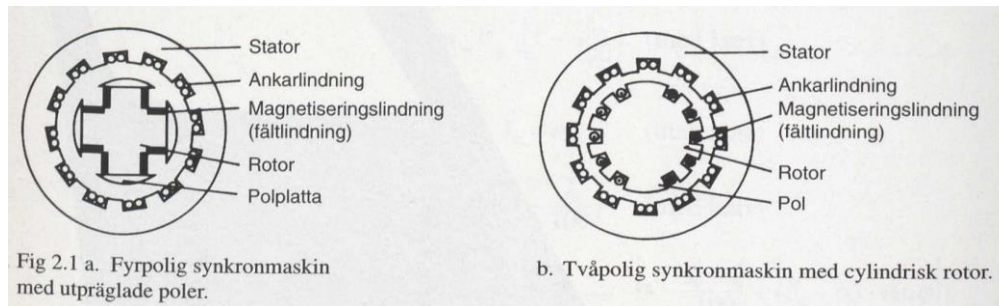
De statiska omriktarna är ifrågasatta då de är dyra i drift på grund av att de kräver speciella komponenter samt att det inte kan leverera tillräckligt kortslutningsström. Då de speciella komponenterna ofta utgår efter bara några år påverkar detta också livslängden på omriktarna[7].

2.2 Synkronmaskinen

Synkronmaskinen består utav en roterande del samt en statisk del, rotern respektive statorn. Som namnet synkronmotor antyder roterar rotern lika snabbt som spänningen över statorn d.v.s. synkront med frekvensen på nätet till skillnad mot en asynkronmaskin, där rotationshastigheten på axeln oftast avviker från nätets frekvens.

2.2.1 Utformning

Vidare finns det två olika typer av rotorutformningar. Cylindriska respektive med utpräglade poler. Antingen förläggs magnetiseringslindningen i spår direkt på rotorn cylindriskt. Eller så förläggs den lindad runt en järnkärna likt en spole med utpräglade poler. I figur 3 nedan så syns dessa två olika utformningar av rotorn[14].



Figur 3 Utpräglade poler respektive cylindriskt placerade poler

Gemensamt brukar rotorns lindningar kallas för magnetiseringslindningar och matas via släppringar eller borstar från en likspänningskälla, en så kallad matare. Alternativt så likriktas spänningen via kraftelektronik monterad i rotorn.

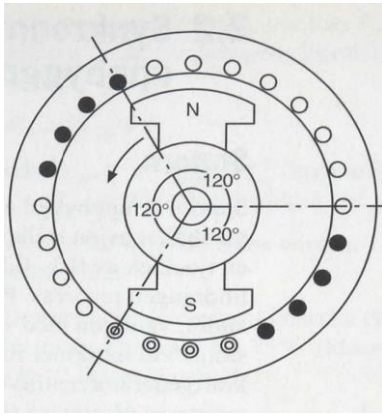
Ett magnetfält som löper vinkelrätt mot järnkärnans luftgap etableras, varvid spänning induceras i statorlindningarna. Statorn är i sin tur uppbyggd av en metallkärna bestående av laminerade plåtar tätt intill varandra. Dessa är sinsemellan isolerade för att undvika cirkulerande strömmar och därmed ytterligare förluster. Plåtarna är belagda med en värmebeständig lack på båda sidor. I dessa är statorlindningarna förlagda i utstansade spår[14].

2.2.2 Funktion

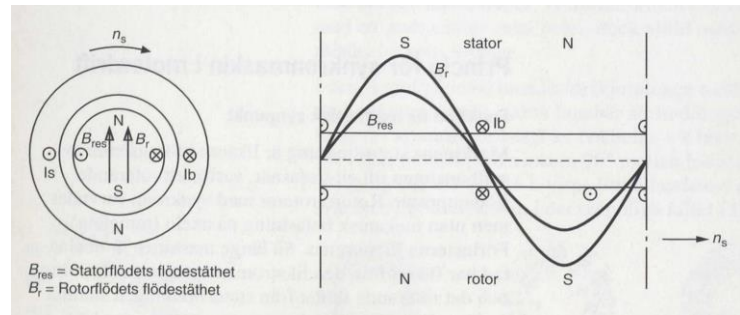
Nedan visas lindningen i statorn för en trefasmaskin. Det svartmarkerade är en fas. Denna lindning har vid strömxponering likt rotorlindningen en nord- och en sydpol. När statorn därför ansluts till ett nät med en viss frekvens skapas magnetfält som roterar med samma frekvens. Dessa magnetfält i stator respektive rotor kommer sträva efter att följa varandras respektive motpoler. Om rotor roterar med samma hastighet kommer magnetfälten därför att attrahera varandras respektives motpoler och låsas.

Det vridmoment som låsningen mellan magnetfälten orsakar syns ur formeln nedan.

$$T = F_s * F_r * \sin(\delta) \quad (1)$$



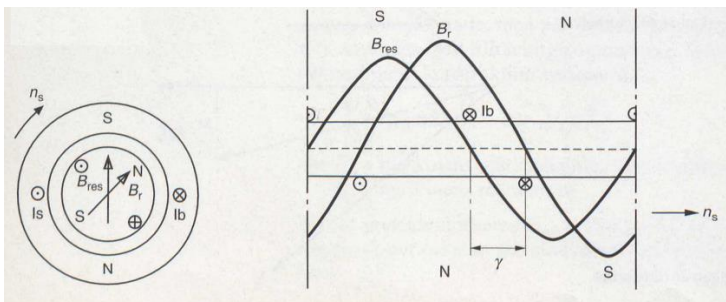
Figur 4 En fas, svartmarkerad



Figur 5 Obelastad maskin vars flöden ligger i fas

Så länge rotorn roterar med det synkrona varvtalet samt går obelastad kommer flödena från rotorn och statorn ligga i fas och låsningen är helt i linje med varandra.

Om en last tillkopplas alternativt ett vridmoment läggs på kommer inget hända med flödena. Vad som förändras är fasläget dessa har jämt emot varandra. Det uppstår en förskjutning mellan dessa två flöden. Låsningen mellan dem kvarstår men rotorns flöde ligger nu före statorns flöde och en positiv ström uppstår med generatorverkan som följd. Alternativt ligger rotorns flöde efter statorns flöde och strömmen får negativt tecken med motordrift som följd. Varvtalet förblir dock konstant [14].



Figur 6 Rotorn förses med ett vridmoment och flödena fasförskjutna jämt emot varandra

Det magnetiska flödet i rotorn kan förklaras med formeln: $F_r = N_f * \frac{i_f}{R_f}$ (2)

Flödet beror av hur många varv ledningen är lindad samt strömmens styrka och hur stort motståndet är i ledningen.

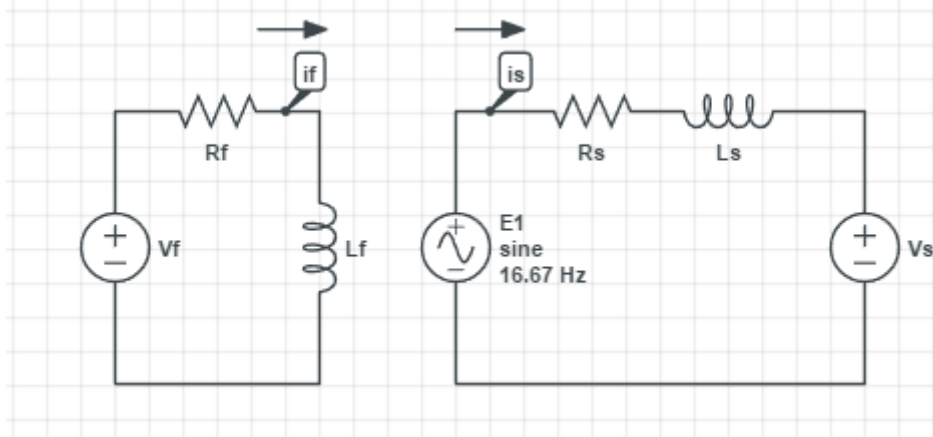
Den inducerade spänningen förklaras med formeln: $E = K_m * F_r * \omega$ (3)

Då antal lindningsvarv samt lindningens resistans inte kan förändras är det magnetiska flödet i rotorn direkt proportionellt mot strömmen genom lindningarna.

Då varvtalet antas vara konstant förändras inte ω . Detta innebär i sin tur att strömmen genom rotorns lindningar är direkt proportionell mot den inducerade spänningen E .

$$V_i \text{ kan nu skriva om formeln som } E = K_m * i_f * \omega \quad (4)$$

En förenklad elektrisk modell av maskinen kan ritas som följande [16].



Figur 7 Elektrisk modell synkrogenerator

Ett mekaniskt vridmoment som påläggs rotorn kan skrivas som:

$$T * \omega = P_{in} \quad (5)$$

Där T står för vridmoment.

Statorströmmen kan ur modellen skrivas:

$$I_s = 3 * \frac{Ea - V_s}{R_s + j * \omega * X_s} \quad (6)$$

R_s kan här försummas då den har så pass liten inverkan och förenklingen dessutom underlättar markant vid beräkningar [14].

Formel (6) visar då att statorströmmens storlek beror på hur mycket större den inducerade spänningen är jämfört med nätspänningen V_s .

I dessa beräkningar antas maskinen vara ideal.

$$T * \omega = P_{in} = P_{ut}$$

För ett trefassystem gäller att den mekaniska kraften ut är lika med 3x enfaskraften in i rotorn.

$$\text{Som i sin tur ger att } P_{ut} = 3 * RE\{E * I_s'\} \quad (7)$$

Där I_s' är det komplexa konjugatet av statorströmmen.

Antagandet görs nu enligt [17]:

$V_s = V_s$ med vinkeln 0 samt $E = E$ med vinkeln δ

Formel (6) blir då omskriven lika med:

$$I_s = 3 * \frac{E * \cos(\delta) + E * j * \sin(\delta) - V_s * \cos(0) - V_s * \sin(0)}{j * \omega * X_s}$$

$$I_s = 3 * \frac{E * \cos(\delta) + E * j * \sin(\delta) - V_s}{j * \omega * X_s}$$

P_{ut} skrivs om med det komplexa konjugatet som [14]:

$$P_{ut} = 3 * (E * \cos(\delta) + j * E * \sin(\delta)) * \frac{(E * \cos(\delta) - j * E * \sin(\delta) - V_s)}{-j * \omega^2 * L_s}$$

Vidare förenklat blir då:

$$P_{ut} = 3 * \frac{V * E * \sin(\delta)}{\omega^2 * L_s}$$

För enfas:

$$P_{ut} = \frac{V * E * \sin(\delta)}{\omega^2 * L_s}$$

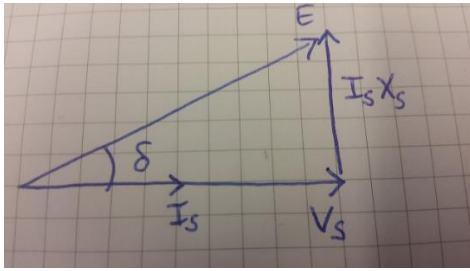
(8)

Antagandet att operationen av generatoren kommer att ske vid ett konstant varvtal görs. Vid en förändring av rotorströmmen förändras den inducerade spänningen. Om kraften som lasten i andra änden av linjen fortfarande kräver skall fortsätta levereras kommer vinkeln δ ändras för att kompensera för ändringen, sett från formel 8.

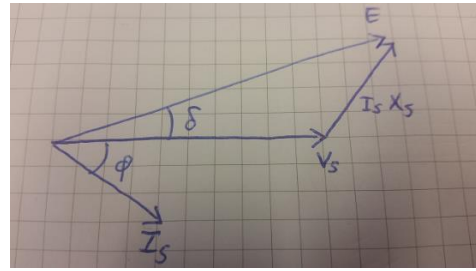
Man får då en undermagnetiserad respektive övermagnetiserad synkrongenerator. Genom att strömmen I_s nu blir fasförskjuten jämfört med V_s kommer vi få ett annorlunda P/Q förhållande. Effektfaktorn sänks alltså.

$$\text{Effektfaktor} = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \quad (9)$$

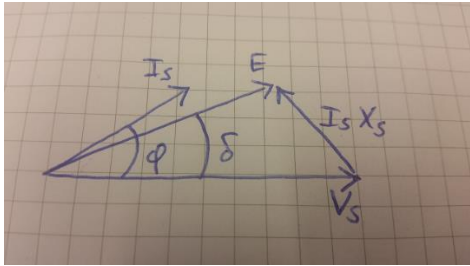
Nedanstående bilder påvisar dessa skillnader då $\varphi < 0$, $\varphi > 0$, samt $\varphi = 0$



Figur 8 Generator vid effektfaktor 1



Figur 9 Övermagnetiserad generator



Figur 10 Undermagnetiserad generator

Ur ovanstående ser vi ett viktigt förhållande i maskinen. Vektorn för statorströmmen I_s är alltid vinkelrät mot vektorn för inducerad spänning E minus statorspänning V_s .

Vad händer då när magnetiseringströmmen ändras i fasdiagrammen[18]?

Effektformler:

$$P = V_s * I'_s * \cos(\varphi) \quad (10)$$

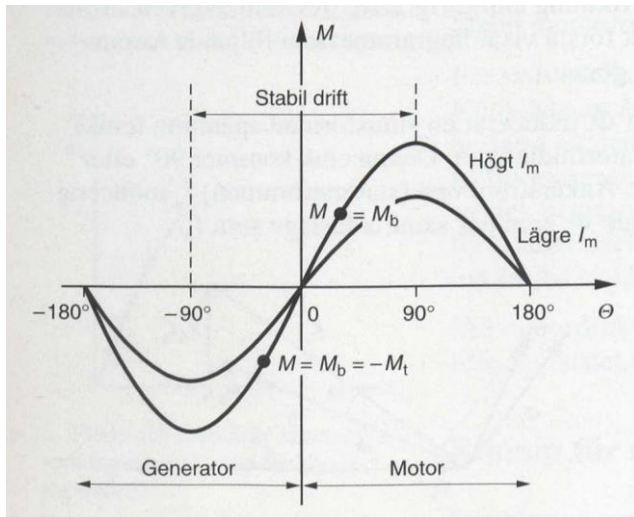
$$Q = V_s * I'_s * \sin(\varphi) \quad (11)$$

Ursprungsläget antas vara ett konstant vridmoment med konstant positivt P_{ut} . V_s är konstant och lika med nätspänningen. Maskinen är en generator och förser nätet med aktiv och reaktiv effekt.

Detta innebär att maskinen är övermagnetiserad. Vi ser i diagrammen att φ är negativ dvs. P och Q förses till nätet ur formlerna 9 och 10. Q säges förse producera reaktiv effekt då denna är negativ.

Magnetiseringströmmen sänks sedan. Men effektbehovet kvarstår sedan tidigare då P är konstant för lasten.

En minskande magnetiseringström kommer innebära att magnetiska flödet i rotern kommer sjunka. Om nu P skall hållas konstant måste alltså vinkeln $\sin(\varphi)$ öka (se formel 1). Samtidigt kommer den inducerade spänningen E att sjunka. Alltså kommer vektorn E att minska i längd men öka i avstånd till vektorn V_s . Vektorn E rör sig uppåt i diagrammet. Detta innebär i sin tur med kravet om vinkelrät förhållande mellan I_s och $I_s * L_s$ att I_s kommer minska sin vinkel φ tills att den blir noll och vi har nått effektfaktor 1. Nu förses enbart aktiv effekt, maxeffekten. Om vi fortsätter minska I_f så blir vinkeln φ tillslut positiv och generatoren börjar att förse lasten med aktiv effekt men förbrukar reaktiv effekt vilket ses ur formel 10 och 11[14].



Figur 10 Drift av synkronmaskin vid olika φ

Ur figuren ser vi att ett minskat I_f också minskar den maximala mängden aktiv effekt vi kan förse nätet med. Vid fallet att följande inte uppnås $-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$ kommer ej längre de magnetiska fälten ha en tillräcklig attraktionskraft att låsa fast i varandra och maskinen faller ur synkron drift med stora kortslutningströmmar och möjlig skada eller förstörelse av maskinen som följd [15].

2.3 Reglerprinciper

För att styra synkronmaskiner och lastdela sinsemellan två maskiner behövs överföringsfunktionen för respektive maskin tas fram vilka kan användas för att dimensionera regulatorer. Dessa kan sedan anpassas för att nå en önskad reglerfunktion. I detta avsnitt följer en kort bakgrund till grundläggande reglerteknik.

I fallet med elektriska maskiner används deras ekvivalenta kretsparameter för att ta fram en överföringsfunktion. Detta kan göras exempelvis via transformering med laplacemetoden. Fördelarna med detta tillvägagångssätt är bland annat att den är mycket lämpligt för simuleringar av systemens dynamiska egenskaper till exempel hur system reagerar på ett stegsvar. Det blir också lättare att omvandla system bestående av flera delar till en sammansatt överföringsfunktion [9].

Laplace transformen definieras enligt nedanstående definition. $F(s)$ är laplace transformen till tidsfunktionen $f(t)$.

$$F(s) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) * e^{-st} dt$$

Laplace transformen kan därmed användas för att beräkna integralen över en viss tidsfunktion från noll till oändligheten. Detta underlättar vid beräkningar av tidsberoende överföringsfunktioner. Med hjälp av denna kan sedan en process fysikaliska egenskaper uppskattas.

För att bestämma överföringsfunktionen till en process, i detta fall elektriska maskiner, kan lämpligen processens kända fysikaliska egenskaper användas. Dessa uppmäts till exempel när det gäller elektriska maskiner genom kortslutnings- eller tomgångsprov där relevanta kretsparametrar kan bestämmas. Elektriska maskiner kan beskrivas genom olika sammansättningar av ekvivalenta kretsparametrar såsom motstånd, kondensatorer och spolar. Motstånd vilket kan betraktas som en linjär komponent transformeras genom laplacetransformen till sitt värde i ohm. En kondensator vars laddning beskrivs som integralen av strömmen blir genom laplacetransformen: $\frac{1}{C \cdot s}$. En spole vars spänning beskrivs som derivatan av strömmen uttrycks med laplacetransformen som $L \cdot s$. Med hjälp av detta kan en överföringsfunktion för hela systemet tas fram vilken sedan kan användas för att ställa in parametrarna i de regulatorer som behövs för regleringen.

De regulatorer som används i detta projekt är en så kallad PI-regulator, vilket står för proportionell respektive integrerande reglering.

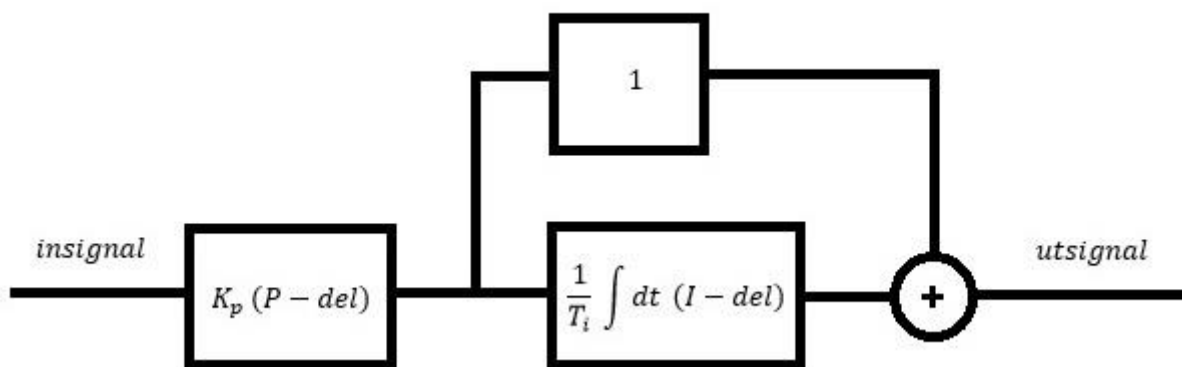


Figure 11 PI-regulator [Egen bild]

Den proportionella regleringen är reglering där styrsignalen har ett rent proportionellt förhållande till reglerfelet i.e storleken på styrsignalen kommer vid en viss tidpunkt att vara i proportion till reglerfelet i samma ögonblick. Den proportionella regleringen kommer ofta också att begränsas inom ett visst intervall då styrsignalen i ett tillämpat reglersystem är begränsat till ett maximalt och minimalt värde. Som exempel kan tas detta projekt där styrsignalen är begränsad till det högsta och lägsta värde för fältspänningen. Vid inställning av proportionella regulatorer behöver en avvägning mellan hastighet och stabilitet göras. Mycket proportionell reglerande verkan ger en snabb regulator med hög förstärkning men stabiliteten försämras och vice versa [9].

Vid integrerande reglering är styrsignalen ett resultat av integralen av reglerfelet. Storleken på styrsignalen vid en viss tidpunkt bestäms av storleken på integralen av felets storlek över tid. Fördelen med integrerande reglering är att regulatorn kan anta olika värden på styrsignalen efter att ett fel är reglerat oberoende av felets karaktär. Proportionell reglering ger dock upphov till kvarstående fel då stationärtillståndet i processen ändras, till exempel genom en stegformad störning. Nackdelen med integrerande reglering är att den är långsammare än den proportionella regleringen då felet måste vara ihållande en viss tid innan det finns en felsignal som är tillräckligt stor att reglera på.

En tredje variant av reglering är deriverande reglering. Vid deriverande reglering reagerar regulatorn på styrsignalens derivata i.e den reglerar på förändringar i styrsignalen.

Deriverande reglering används aldrig ensamt utan behöver kombineras med de andra typerna av regulatorer till exempel i form av en PD-regulator eller en PID-regulator. Fördelarna med deriverande reglering är ökad stabilitet och snabbhet i reglersystemet. Nackdelarna är dock att systemet kräver stora styrsignaler samt att systemet blir känsligt för högfrekventa störningar[9], Av dessa anledningar kommer deriverande verkan inte att användas inom ramarna för detta projekt.

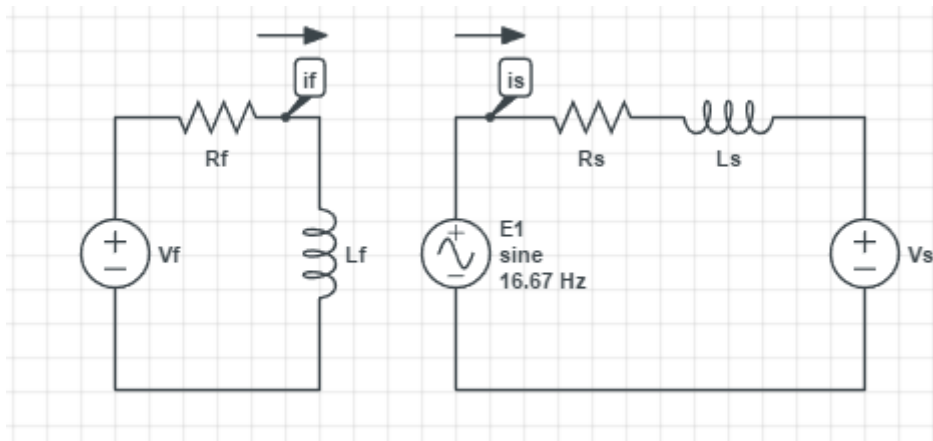
3 Metod

3.1 Beräkningar av parametrar

Inom ramarna för detta arbete kommer en simuleringsmodell för en roterande omformare av typen Q38/Q39 konstrueras, modellen har valts i samråd med Malin Fridmar då den används för tillfället i Varbergs omformarstation[13]. Maskinparametrar är hämtade från trafikverkets rapport gällande omformarstationer[6].

3.1.1 Tomgångsberäkningar

Vid tomgångsprov lämnas statordelen av kretsen öppen och strömmen över rotorimpedansen ger upphov till en inducerad spänning E som är lika stor som märkspänningen V_s . Då tomgångsprov utförs på generatordelen av Q38/Q39 är tomgångsströmmen genom rotorlindningarna 148 A.



Figur 7 elektrisk modell synkron generator (2)

Enligt Kirchoffs spänningslag blir då strömmen i_s lika med noll. Med dessa parametrar färdigställda används sedan formel 4:

$$E = K_m * i_f * \omega \quad (4)$$

Ur denna kan vi då lösa ut motorkonstanten med hjälp av tomgångsdata ur trafikverkets rapport[6]: $K_m = \frac{4000}{148 * 2 * \omega} = 0.258$

Resistansen i fältkretsen är enligt bilaga 1 $R_f = 0.208 \Omega$.

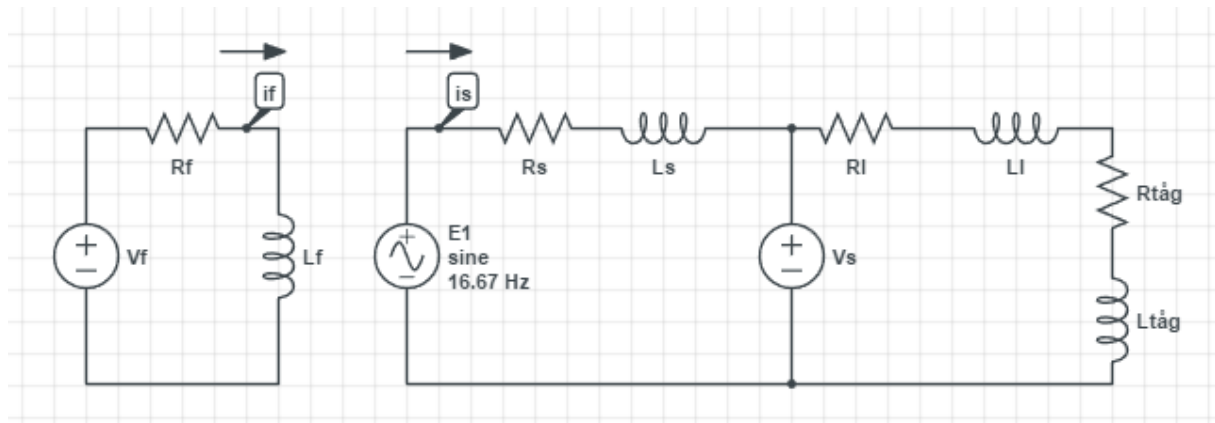
Sedan tidigare är det känt att huvudfältskonstanten i Q38/Q39 är 1.5 sekunder [7]. Denna bestämmer stigtiden på strömmen genom fältkretsimpedansen.

$$\text{Formel för stigtid: } T_s = \frac{L_f}{R_f} \quad (11)$$

Från formel 11 kan induktansen i fältkretsen beräknas till $L_R = 0.312 \text{ H}$.
 Ur figur 7 framgår att $V_f = i_f * R_f$ detta då fältspänningen är en likström, detta ger att fältspänningen som krävs för tomgångsström ges utav $V_f = 148 * 0.208 = 30.784 \text{ V}$.

3.1.2 Märklasterberäkningar

Om modellen för generatoren istället betraktas som en sluten krets genom anslutning av en last, se figur 12. Kommer då strömmen i_s flöda genom statorn mot lasten, då den inducerade spänningen E överstiger märkspänningen V_s .



Figur 12 elektrisk modell synkrogenerator med last

Parametrar för Q38/Q39 vid märklaster fås från trafikverkets rapport[6]. Generatoren producerar 4 MVA, $i_f = 268 \text{ A}$, $i_s = 1000 \text{ A}$ och statorresistansen $R_s = 0.0179 \Omega$.

Vid belastning kommer E att överstiga märkspänningen och en ström kommer flöda mot lasten.

$$E = K_m * i_f * \omega$$

Ur formeln kan värdet för den inducerade spänningen i statorn vid märklaster beräknas till $E = 0.258 * \omega * 268 = 7.013 \text{ kV}$. För att räkna ut induktansen i statorn kan därefter formel 12 för statorströmmen användas.

$$i_s = \frac{E_a - V_s}{R_s + \omega * L_s} \rightarrow i_s = \frac{E_a - V_s}{\omega * L_s} \quad (12)$$

Eftersom R_s är så liten kan den försummas vid beräkningar och ur formel 12 ser vi att $L_s = \frac{E - V_s}{i_s * \omega} = \frac{7013 - 4000}{1000 * \omega} = 0.02878 \text{ H}$.

3.2 Parametrar för last

I detta projekt består lasten av en matarledning och ett tåg. Matarledningen modelleras som en komplex impedans bestående av en resistiv och en induktiv komponent. Tåget modelleras som en rent resistiv last i detta arbete. I detta avsnitt kommer framtagningen av dessa parametrar att diskuteras vidare.

Detta är en representation av mycket mer komplicerade verkliga förhållanden men ses i detta projekt som tillräckligt nära verkligheten för att kunna studera hur de olika omformarna lastdelar sinsemellan.

3.2.1 Parametrar för matarledning

I detta projekt har parametrar för matarledningar hämtats från BaneNOR, vilket är det statliga företag som ansvarar för det norska tågnätet[12]. I tabell 1 nedan framgår sträckningar mellan olika omformarstationer i norska järnvägsnätet samt impedanser på dessa ledningar.

Tabell 1 Sträckningar av järnväg samt dess ledningsimpedanser [12]

Streckning	Lengde [km]	R [Ω]	X [Ω]	r [Ω /km]	x [Ω /km]
Bergensbanen					
Bergen omf. – Dale omf.	43,19	7,515	8,465	0,174	0,196
Dale omf. – Mjølfjell omf.	68,943	12,341	14,547	0,179	0,211
Mjølfjell omf. – Myrdal	18,497	3,773	3,551	0,204	0,192
KL: Myrdal – Haugastøl omf.	55,164	11,253	10,591	0,204	0,192
FSL: Myrdal – Haugastøl omf.	55,164	8,826	12,136	0,160	0,220
Haugastøl omf. – Nesbyen omf.	87,080	16,284	18,287	0,187	0,210
Nesbyen omf. – Hønefoss omf.	91,299	16,616	19,173	0,182	0,210
Hønefoss omf. – Lunner omf.	37,9	7,333	8,632	0,193	0,228
Randsfjordbanen					
Hønefoss omf. - Hokksund	60,614	11,274	13,274	0,186	0,219
Hokksund – Drammen kbh.	17,44	2,947	3,471	0,169	0,199

För att få en bra representation av en möjlig ledning och dess komplexa impedans har medelvärden för impedanserna per kilometer räknats fram vilka används vid simulationer. I tabell 2 framgår framräknade ledningsimpedans.

Tabell 2 Framräknade medelvärden av ledningsimpedanser

	Ω /km
R_{medel}	0,184
X_{medel}	0,208

Längden på de ledningarna som används har uppskattats efter de givna sträckningarna. Detta projekt omfattar en modell av en omformarstation. I detta projekt antas att den längsta ledning som en omformarstation belastas av är halva sträckningen till nästa station, varefter nästa station tar över majoriteten av matningen. Därför utförs simuleringar vid 1 km, 20 km och 40 km ledningar. Detta motsvarar i detta projekt ett urval av ledningslängder vilka anses som en tillräcklig uppskattning av olika längder för att kunna få tillräckligt bra resultat. De avrundade värdena underlättar också vid kontrollberäkningar förhand.

3.2.2 Parametrar för tåg

För att modellera tåget i lasten används formel 13, genom att effektkonsumtionen hos ett modernt tåg är känd kan en resistans bestämmas.

$$R = \frac{\left(\frac{U}{\sqrt{2}}\right)^2}{P} \quad (13)$$

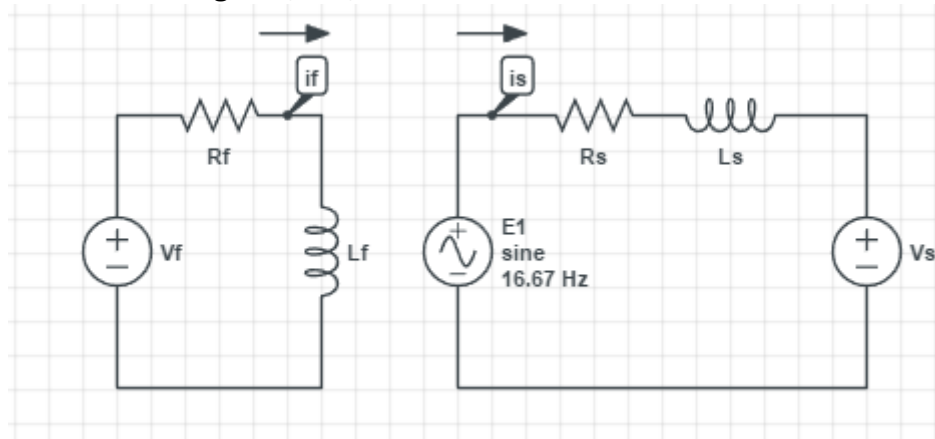
Ett X2000 tåg vilket används på svenska järnvägen drar 3.26 MW [8]. Skenspanningen över skenan vilket spänningssätter tåget regleras till effektivvärdet av klämspanningen hos Q38/Q39 vid märklaster ($\frac{4}{\sqrt{2}}$ kV). Används detta i formel 13 fås följande värde för en resistans vilken kan användas för att simulera ett tåg med effektfaktor 1.

$$2.454 \Omega = \frac{\left(\frac{(4 * 10^3)}{\sqrt{2}}\right)^2 V}{3,26 * 10^6 W}$$

3.3 Modellering i Simulink

Parametrarna för Q38/Q39 och lasterna kan nu implementeras i en simuleringsmodell i Simulink. Detta avsnitt kommer att behandla tillvägagångssättet för denna del av arbetet.

3.3.1 Modellering av Q38/Q39



Figur 7 elektrisk modell av synkrongenerator (3)

Ur figur 7 härleds ekvationen för spänningen i rotorn

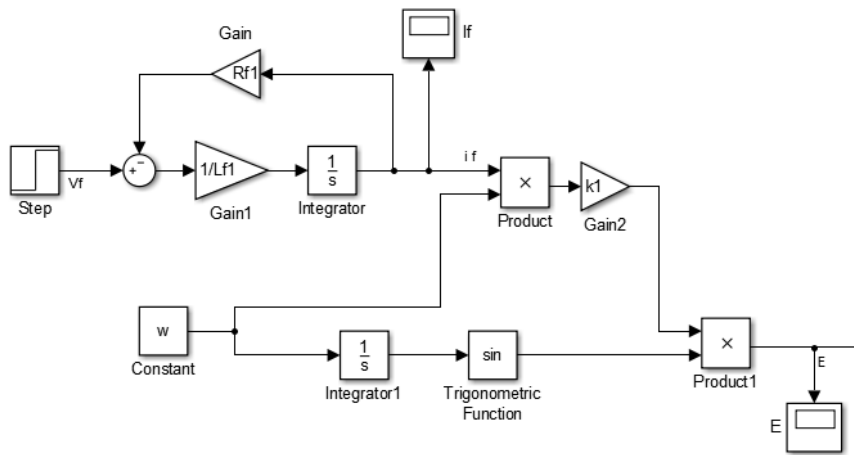
$$V_f - i_s * R_f - \frac{di_f}{dt} * L_f = 0$$

Omskrivet blir detta

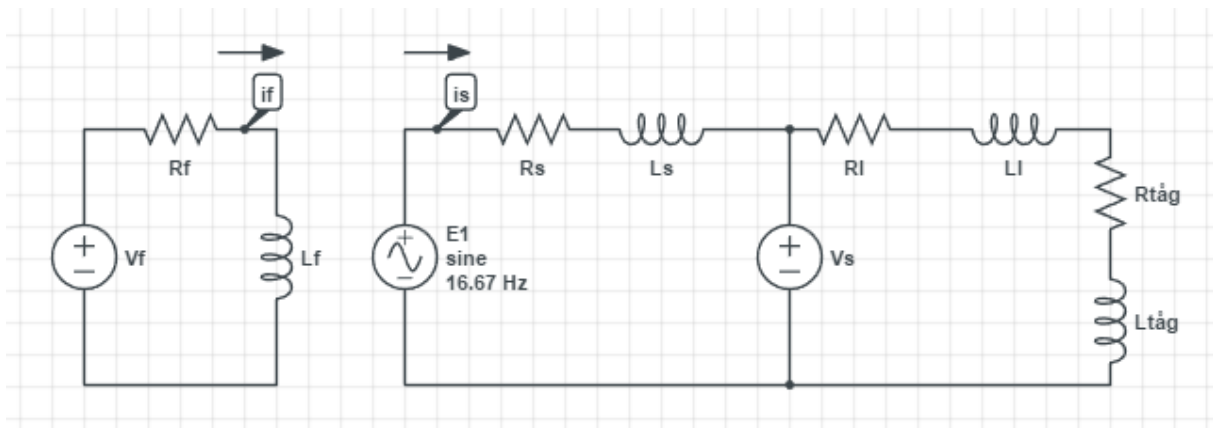
$$\begin{aligned} [V_f - i_s * R_f] * \frac{1}{L_f} &= \frac{di_f}{dt} \\ i_f &= \int [V_f - i_s * R_f] * \frac{1}{L_f} \end{aligned} \quad (14)$$

Med hjälp av de tidigare bestämda parametrarna samt formel 12 och 4 kan en modell konstrueras.

Ur denna kan rotordelen modelleras som:



Figur 13 Modell Rotor



Figur 12 elektrisk modell synkrogenerator med last (2)

V_s skall ses som en mätning ej en spänningskälla, då programmet saknade denna illustration.

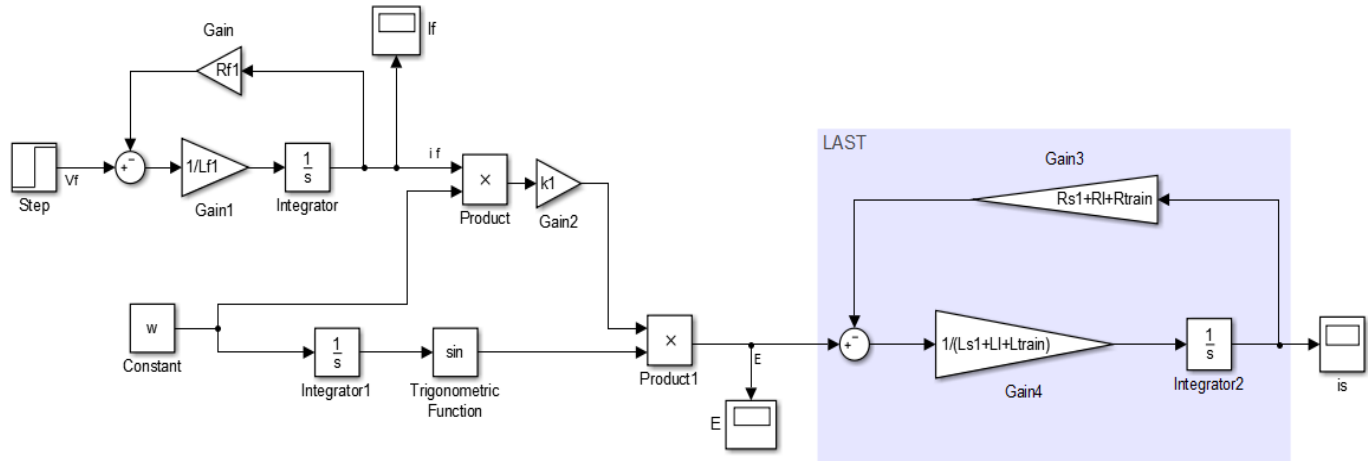
Ur figur 12 framgår att ekvationen för spänningen i statorn då lasten är tillkopplad blir

$$E - \frac{di_s}{dt}(L_s + L_l + L_{train}) - i_s(R_s + R_l + R_{train}) = 0$$

Omskrivet ger detta ekvationerna

$$\begin{aligned} \frac{di_s}{dt} &= [E - i_s(R_s + R_l + R_{tåg})] * \frac{1}{(L_s + L_l + L_{train})} \\ i_s &= \int [E - i_s(R_s + R_l + R_{tåg})] * \frac{1}{(L_s + L_l + L_{train})} \end{aligned} \quad (15)$$

Ur ekvation 15 kan modellen byggas ut enligt illustration i figur 14



Figur 14 Modell rotor+last

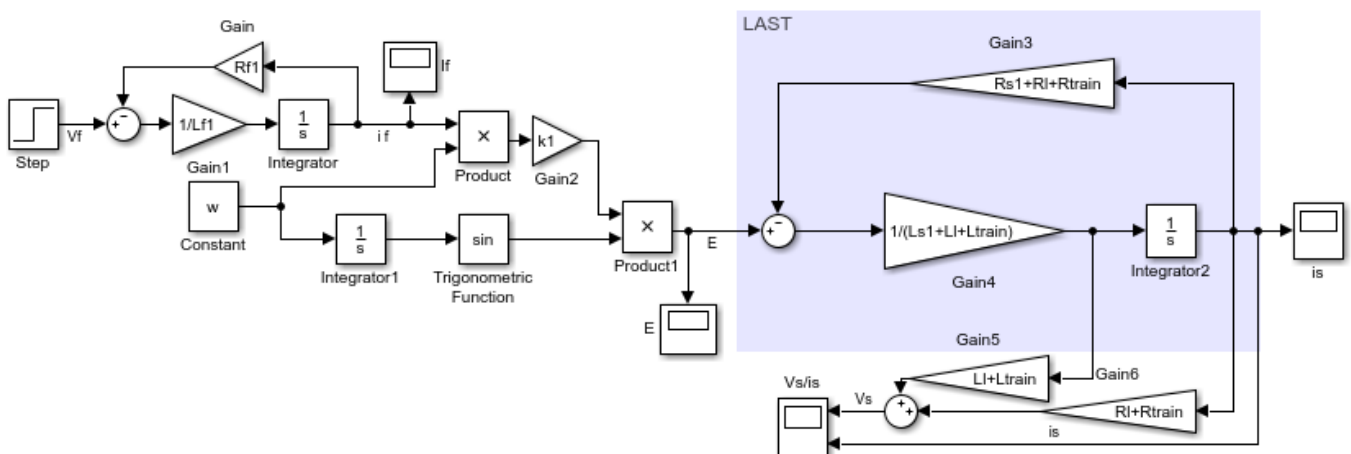
Utsignalen blir i_s och omräkning krävs för att bestämma spänningen V_s . Denna fås genom att ställa upp ekvationen för lastsidan av figur 6 enligt:

$$V_s - i_s(R_l + R_{train}) - \frac{di_s}{dt}(L_l + L_{train}) = 0$$

Omskriven ger denna ekvation:

$$V_s = i_s(R_l + R_{train}) + \frac{di_s}{dt}(L_l + L_{train}) = 0 \quad (16)$$

Ur ekvation (16) byggs modellen ut till:



Figur 15 Modell Rotor+last+skenspänning

3.3.2 Modellering av parallellkopplade roterande omformare

Ur denna modell kan sedan ekvationerna för de båda omformarna skrivas som

$$E_1 - V_{Ls1} - R_{s1}i_{s1} - V_{Ll} - R_L(i_{s1} + i_{s2}) - R_{train}(i_{s1} + i_{s2}) - V_{Ltrain} = 0$$

$$E_2 - V_{Ls2} - R_{s2}i_{s2} - V_{Ll} - R_L(i_{s1} + i_{s2}) - R_{train}(i_{s1} + i_{s2}) - V_{Ltrain} = 0$$

Eftersom de båda omformarna går i paralleldrift och tillsammans förser lasten med kraft påverkar de två utströmmarna från respektive generator varandra. För att bestämma strömmen ut från den ena omformaren behöver den andras parametrar tas i beaktning och vice versa. För att räkna fram de nya parametrarna används matrisberäkningar vilka sedan kan implementeras i Simulink enligt figur 18.

På matrisform skrivs detta enligt ekvation 17

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (R_{s1} + R_l + R_{train}) & (R_l + R_{train}) \\ (R_l + R_{train}) & (R_{s2} + R_l + R_{train}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix} \\ \mathbb{E} & \qquad \qquad \mathbb{R} & \qquad \qquad \mathbb{I} & \qquad \qquad (17) \\ + \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_l + L_{train}) & (L_l + L_{train}) \\ (L_l + L_{train}) & (L_{s2} + L_l + L_{train}) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix} \\ & \qquad \qquad \mathbb{L} & \qquad \qquad \frac{d\mathbb{I}}{dt} \end{aligned}$$

$$\mathbb{L} \frac{d\mathbb{I}}{dt} = \mathbb{E} - \mathbb{R}\mathbb{I} \rightarrow \mathbb{L}^{-1}\mathbb{L} \frac{d\mathbb{I}}{dt} = \mathbb{L}^{-1}\mathbb{E} - \mathbb{L}^{-1}\mathbb{R}\mathbb{I}$$

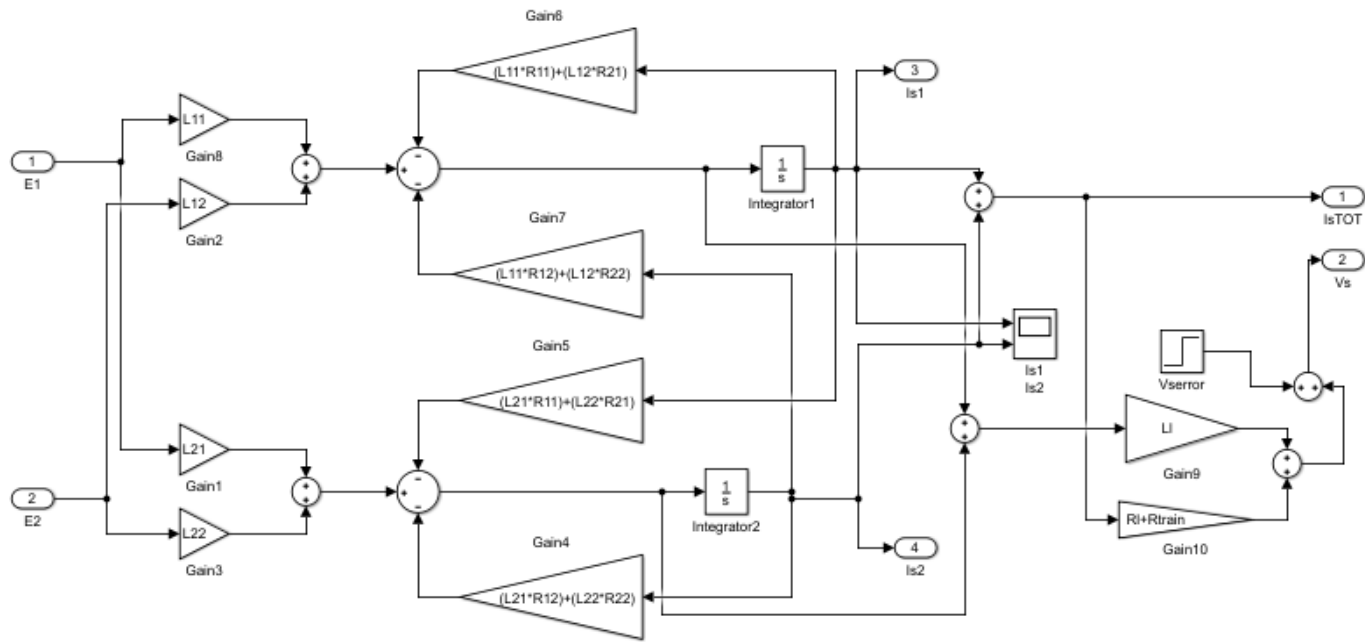
Vilket resulterar i:

$$\frac{d\mathbb{I}}{dt} = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix} = \mathbb{L}^{-1}\mathbb{E} - \mathbb{L}^{-1}\mathbb{R}\mathbb{I}$$

Matrisen $\mathbb{L}^{-1}$ beräknas med MATLAB och vi får en matris med elementen L11, L12, L21 och L22.

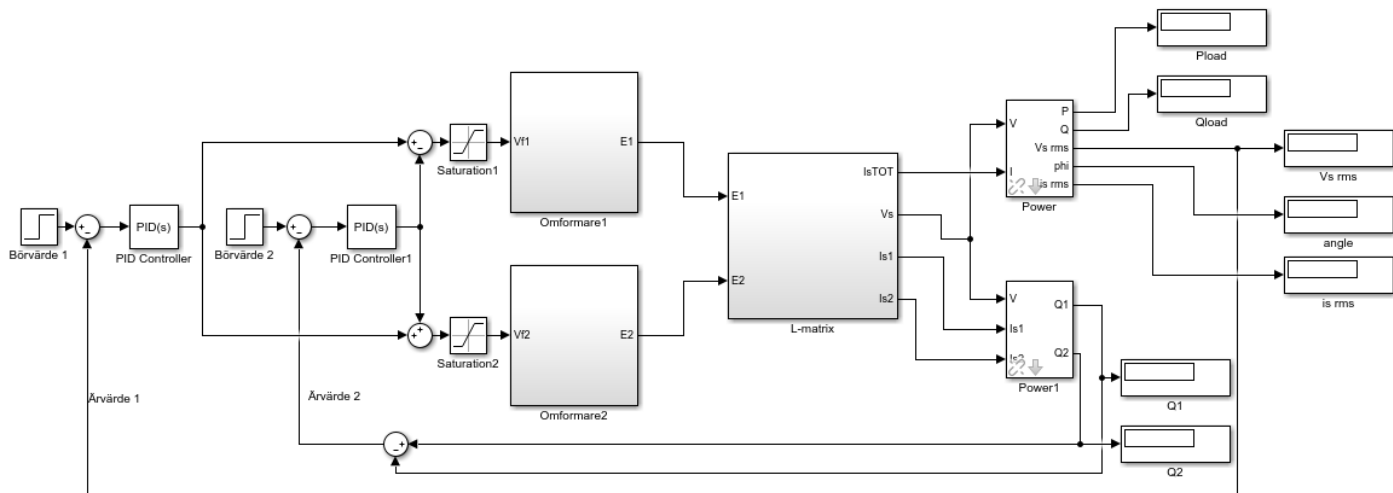
Matrisen $\mathbb{R}$ får likt $\mathbb{L}^{-1}$ samma elementuppbyggnad. R11, R12, R21 och R22.

Dessa används senare i Simulink för den slutgiltiga modellen se figur 18.



Figur 18 Modell för L-matrisen

Då de parallellkopplade omformarna skall förse hälften av den totala reaktiva effekten var när de har identisk storlek införs en strömåterkoppling utöver spänningsåterkopplingen. Den slutgiltiga modellen framgår av figur 19 där även två mättnadsblock ingår. Dessa har till funktion att förhindra överspänningar vid grova fel och är satta att begränsa spänningen till 55 V.



Figur 19 Återkopplad färdig modell

3.4 Reglersystemet

Först bestämdes storleksförhållandet mellan in/ut signaler och därefter uppskattades parametrarna för regulatorerna genom stegsvarsanalys. Insignalerna till omformarna utgörs av två fältspänningar mellan 30- 55 V. De återkopplade värdena utgörs av skenspanningen vilken ska regleras till att vara $\frac{4}{\sqrt{2}}$ V och skillnaden mellan de två reaktiva effekterna vilka varierar mellan 0 och flera MVar. För att skala de proportionella delarna av regulatorerna togs kvoter fram mellan börvärden och insignaler. När rätt storleksordningar uppskattats ökades de proportionella delarna tills systemet började självsvänga och blev instabilt. Därefter sänktes den proportionella delen tills stabilitet återficks. Först bestämdes parametrarna för den inre reglerloopen och sedan den yttre.

Storleken på den integrerande delen avgjordes genom att öka den tills att det kvarstående felet skapat av den proportionella delen försvunnit.

För framtagna värden se tabell 3.

Tabell 3 P- och I-värden för de ingående regulatorerna. Värden ges både för den yttre och den inre lopen.

Reglerparametrar	Värden
P _{yttre}	0,019
I _{yttre}	0,015
P _{inre}	$12.5 \cdot 10^{-5}$
I _{inre}	$12.5 \cdot 10^{-5}$

4. Resultat

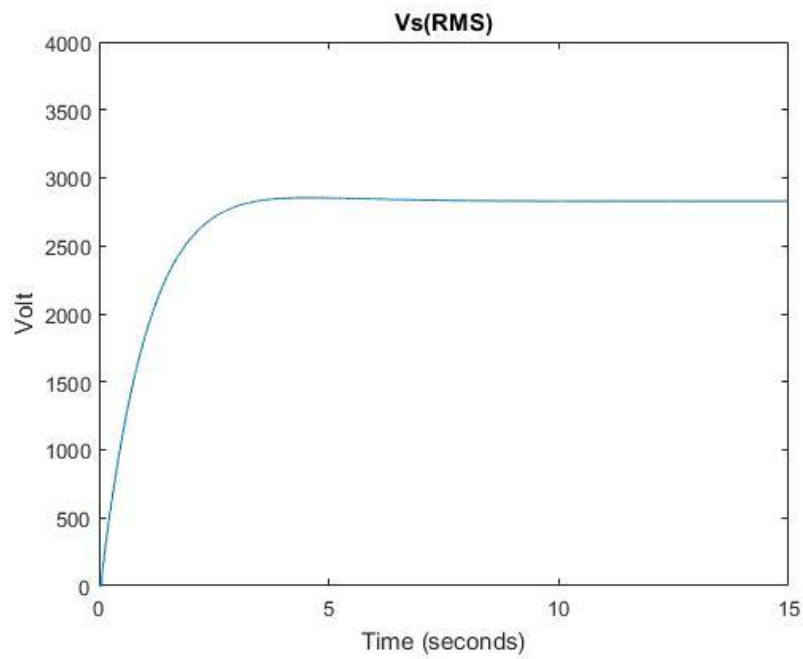
För att kunna analysera funktionen i de regulatorer som tagits fram inom har tre olika fall testats. De olika fallen representerar olika störningsfall, vilka alla representerar två omformare som hamnar i olika driftlägen. Störningar implementeras och regulatorernas funktion kan därefter utvärderas. För att det ska framgå tydligt var i systemet störningarna inträffar har olika tider valts. Störningar i omformare 1 sker efter 6 sekunder, störningar i omformare 2 sker vid 8 sekunder och störningar i skenspanningen sker efter 10 sekunder. Storleken på dessa störningar har uppskattats med hjälp av handledaren Lars Christoffersson och motsvarar en rimlig störning i en verklig omformarstation[7].

4.1 Fall 1, 1 km ledning fel pålagt i V_s och i_s

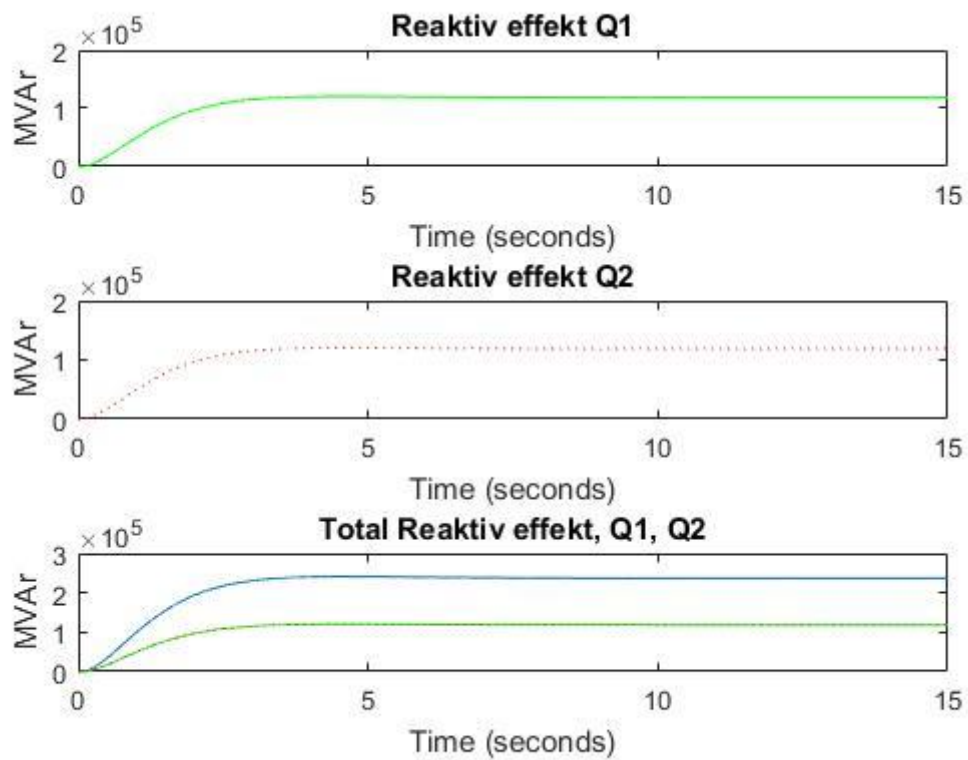
I detta fall är ledningen mycket kort och lasten kommer därför att domineras av tågets resistiva karaktär. En störning läggs på skenan vilket matar lasten, skenspanningen sänkt med 3 %, ytterligare en störning läggs på omformare 1 där fältströmmen sänks med 5 % och en sista störning läggs på omformare 2 där fältströmmen höjs med 5 %.

4.1.1 Fall 1 utan pålagda fel

Vilket framgår av figur 20-21 så klarar regulatorn både av att hålla skenspanningen på önskad nivå, $\frac{4}{\sqrt{2}}$ kV, samt att lastdela så att den reaktiva effektproduktionen sker jämnt mellan de två omformarna. Insvängningsförloppet i början av graferna är en effekt av tröghet vid etablering av fältströmmar vid uppstart och inte något som kan kontrolleras genom regulatorn.



Figur 20 Graf över skenspänning utan pålagda störningar

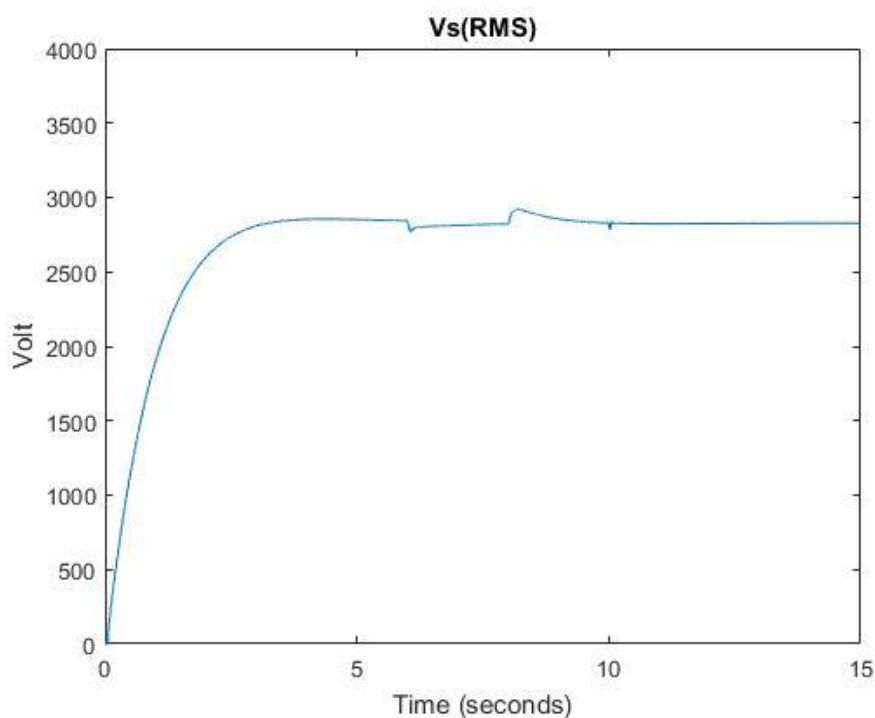


Figur 21 Graf över reaktiv effekt utan pålagda störningar

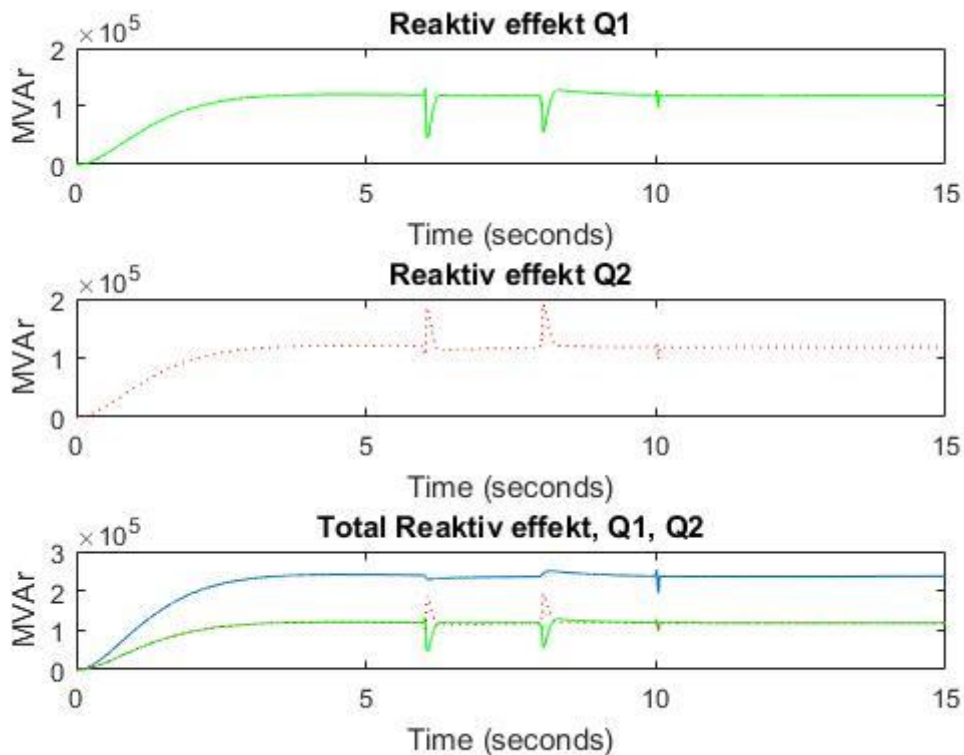
4.1.2 Fall 1 med pålagda störningar

När störningar förs in i modellen avviker utsignalerna från önskade värden. Men vilket tydligt framgår av figur 22-23 svänger utsignalerna efter en tid in sig till önskade värden. När en störning sänker fältströmmen i omformare 1 sker en minskning av producerade reaktiva effekt, en minskning som direkt kompenseras av omformare 2. Regleringen börjar omedelbart att reglera felet och den reaktiva effekten delas återigen jämt mellan de båda roterande omformarna tills nästa störning inträffar i omformare 2, en höjning av fältströmmen. Påverkan på utsignalen blir liknande som vid första störningen, den producerade reaktiva effekten sänks i omformare 2 och sänkningen kompenseras direkt av omformare 1.

Störningen på skenspanningen får så liten inverkan på utsignalen att det knappt syns i graferna men en liten spik kan ses vid 10 sekunder i figur 22-23.



Figur 22 Fall 1 med pålagda störningar skenspanning



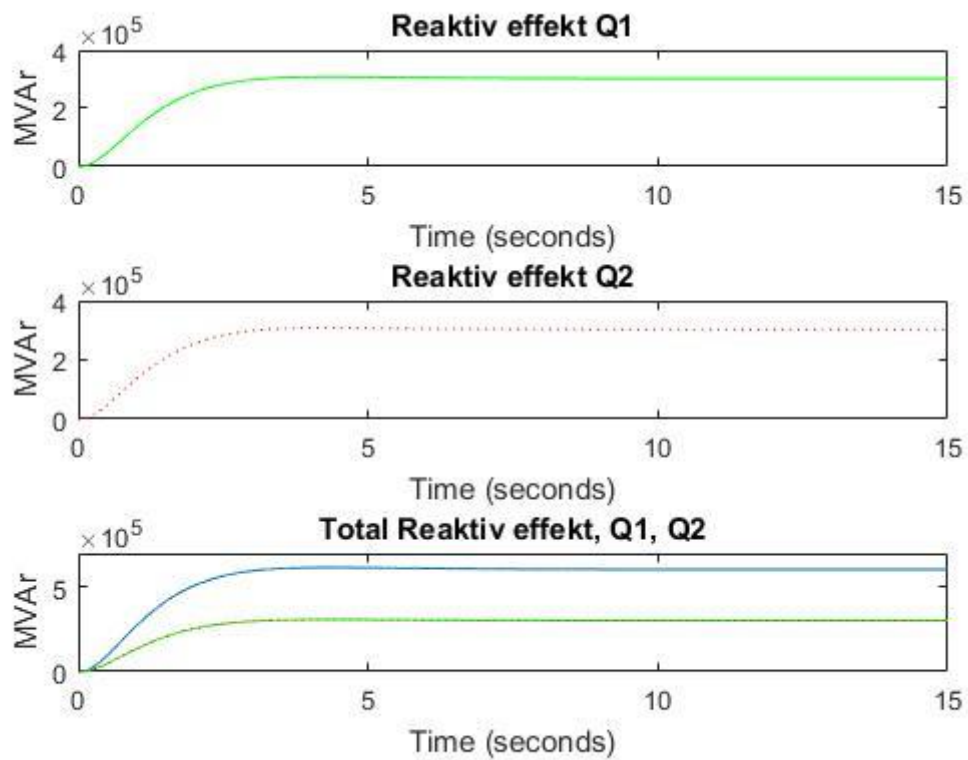
Figur 23 Fall 1 med pålagda störningar reaktiv effekt

4.2 Fall 2, 20 km ledning V_s -error och i_s -error och med olika parametrar på omformarna

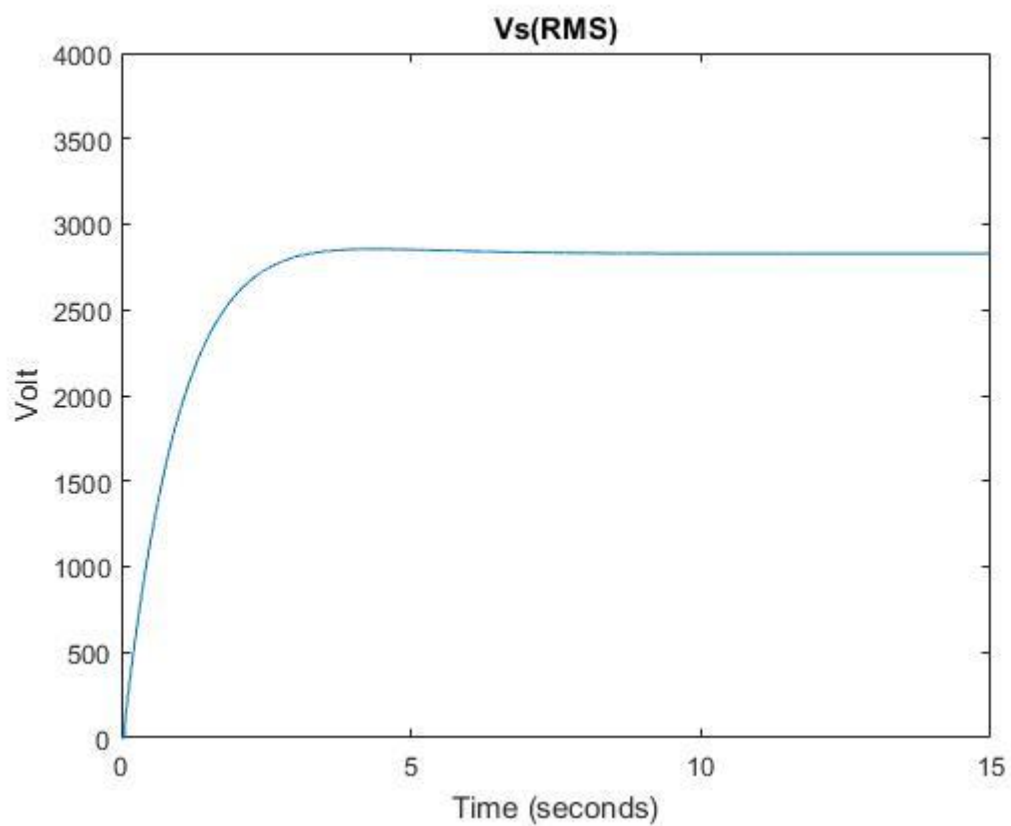
Nu ökas ledningslängden till 20 km och en ny kombination av störningar testas, skenspanningen höjs med 3 %, fältströmmen i omformare 1 höjs med 5 % och fältströmmen i omformare 2 sänks med 5 %. Lastens karaktär är nu mer induktiv än i fall 1, detta tillsammans med en ny typ av störningar gör att regulatören kan utvärderas under nya förutsättningar. Ytterligare ett test utförs där lastdelning mellan två roterande omformare med olika storlekar testas. Omformare 2 görs då 25 % större än Omformare 1.

4.2.1 Fall 2 utan pålagda störningar

Insvängningsförloppet är det samma som tidigare på grund av de fasta parametrarna hos de roterande omformarna. Det kan även observeras att en ökad längd på ledningen i lasten leder till en ökad produktion av reaktiv effekt. Slutvärdet för skenspanningen når det önskade börvärdet.



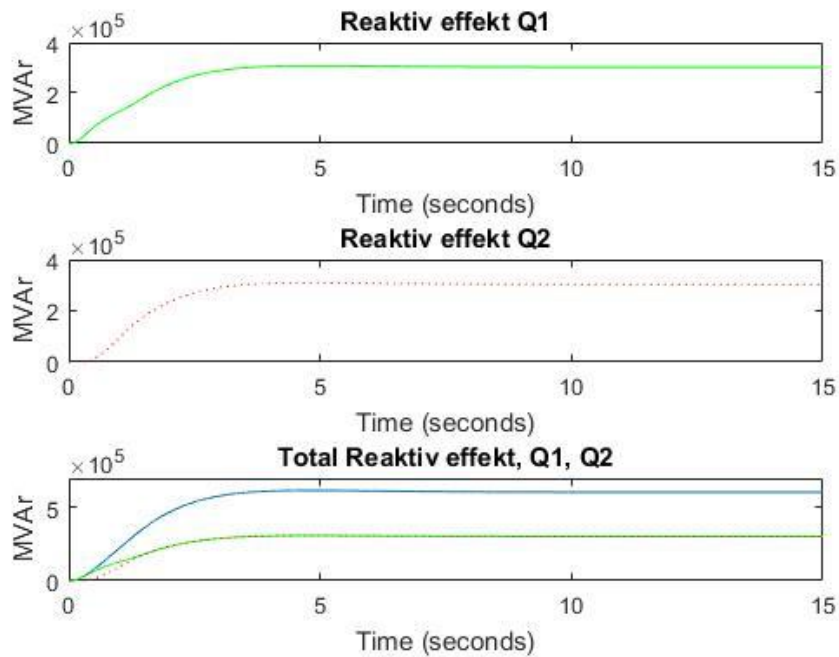
Figur 24 Fall 2 utan pålagda störningar reaktiv effekt



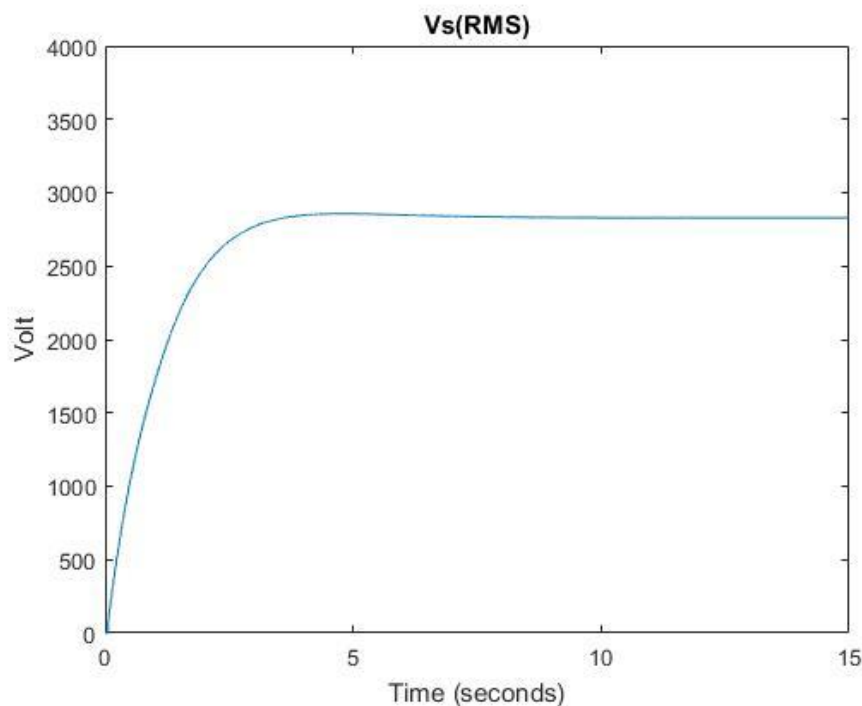
Figur 25 Fall 2 utan pålagda störningar skenspänning

4.2.2 Fall 2 olika storlekar för de två omformarna

I detta fall har de två omformarna olika storlekar. Detta representeras genom att resistanser och induktanser i rotor och stator är 25 % större i omformare 2. Lastdelningen ger fortfarande en jämn fördelning av den reaktiva effekten dock kan en viss skillnad i insvängningsförloppet ses mellan omformare 1 och omformare 2. Vid stor skillnad i storlek kommer fältspänningen i den mindre av omformarna att bli väldigt hög, då det är denna signal som används som styrsignal. Dessa höga spänningar ger höga strömmar vilka potentiellt kan förstöra rotorlindningen. Därför kan ett lastdelningssystem likt detta endast klara av mindre skillnader i storlek hos omformarna. Då en viss snabbhet i regleringen eftersträvas.



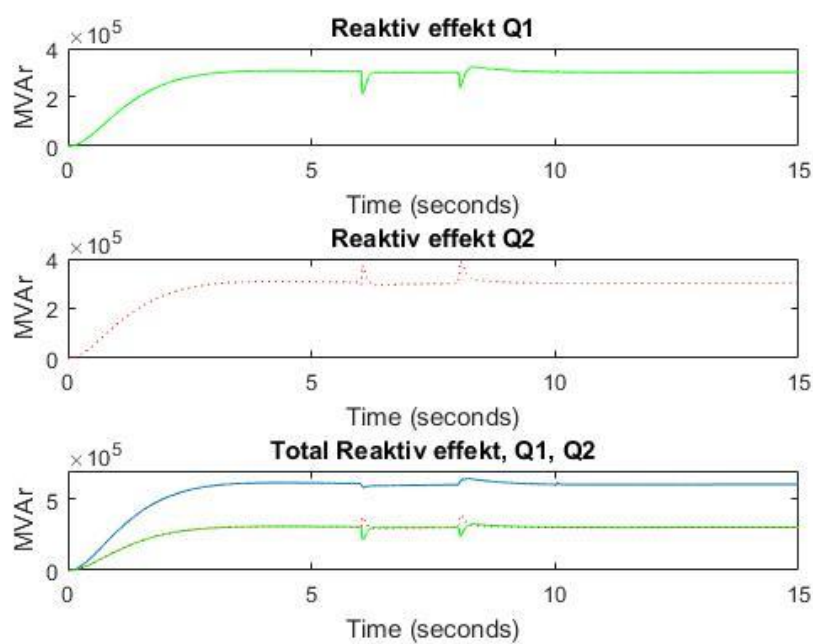
Figur 26 Fall 2 olika parametrar för de roterande omformarna reaktiv effekt



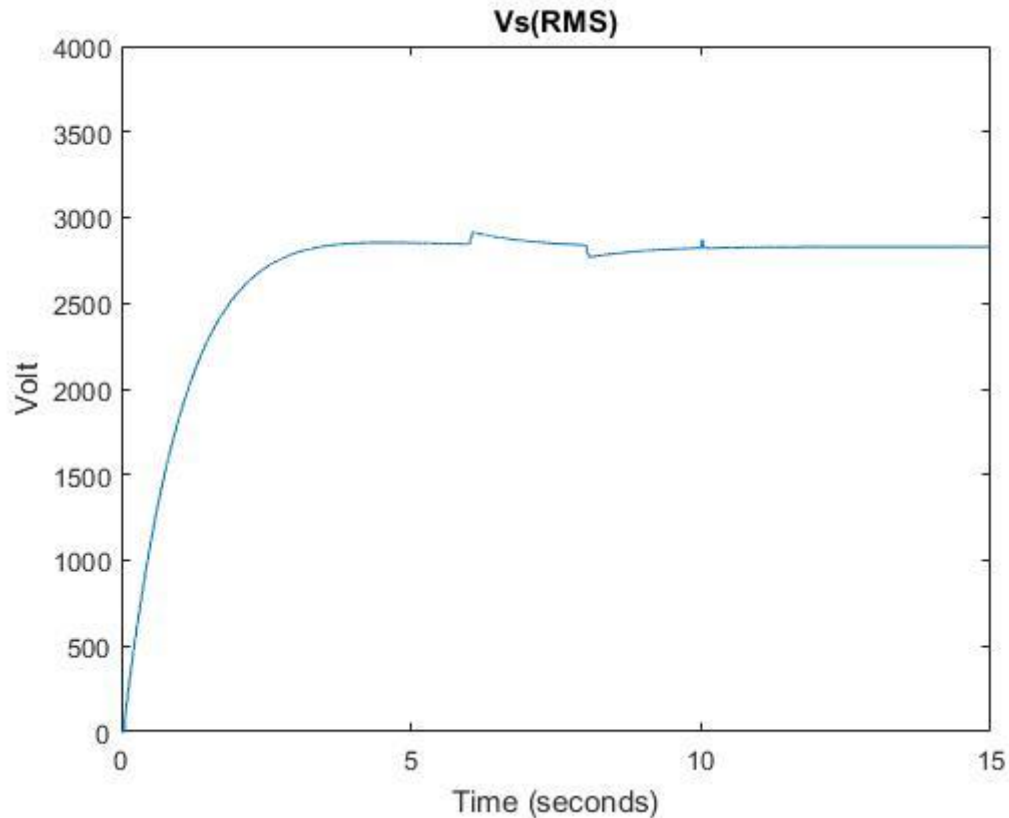
Figur 27 Fall 2 olika parametrar för de roterande omformarna skenspänning

4.2.3 Fall 2 med pålagda störningar

Störningarna som läggs på är annorlunda gentemot fall 1 med en annan längd på ledningarna. Det produceras mer reaktiv effekt men regleringen av felet skiljer sig inte mycket från fall 1. Inverkan av störningen på skenspänningen vid 10 sekunder har mindre inverkan här då den knappt syns i graferna över reaktiv effekt vilket kan ställas i relation till felen i fältströmmen som syns tydligt.



Figur 28 Fall 2 med pålagda störningar reaktiv effekt



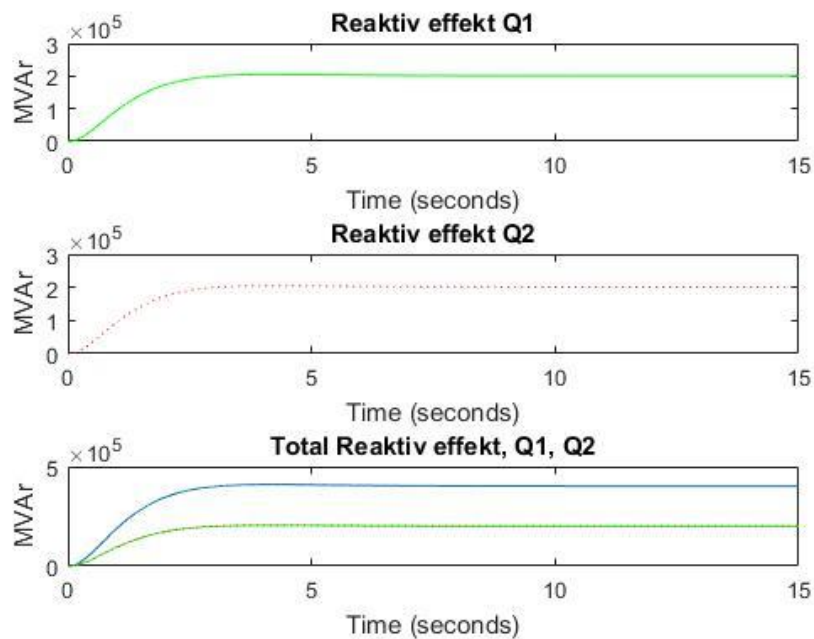
Figur 29 Fall 2 med pålagda störningar skensspänning

4.3 Fall 3, 40 km ledning, fel pålagda i V_s och i_s

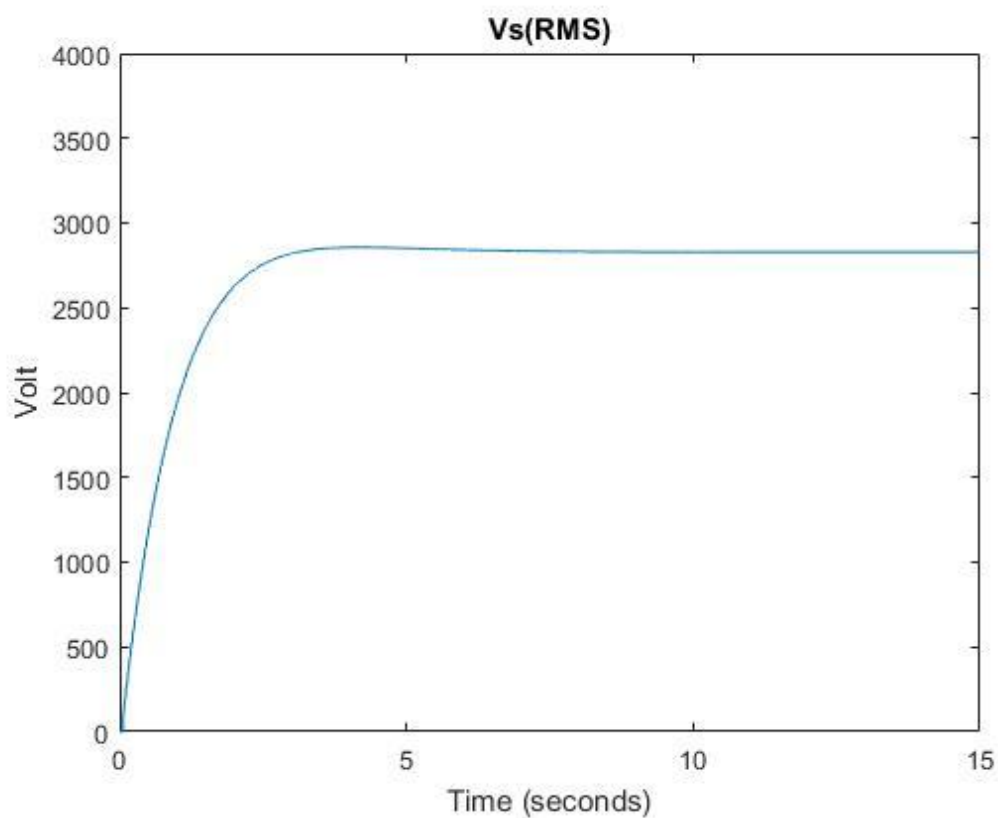
Fall 3 vilket har den längsta ledningen och är därmed det fall där tåget är minst dominerande i lasten. Detta fall motsvarar ett tåg som är så långt som möjligt från den matande omformarstationen innan nästa omformarstation tar över majoriteten av kraftförsörjningen. Störningarna i detta fall är att skenspänningen höjs med 3 %, fältströmmen i omformare 1 sänks med 5 % och fältströmmen i omformare 2 sänks med 5 %.

4.3.1 Fall 3 utan pålagda störningar

Den totala reaktiva effekten har nu minskat vilket inte hade varit fallet i verkligheten. Varför det blir så i denna modell kommer att diskuteras vidare i diskussionsavsnittet. Lastdelningen fungerar som den ska även om den reaktiva effekt som totalt produceras är för låg. Även skenspänningen hålls på en bra nivå trots den låga produktionen av reaktiv effekt.



Figur 30 Fall 3 utan pålagda störningar reaktiv effekt

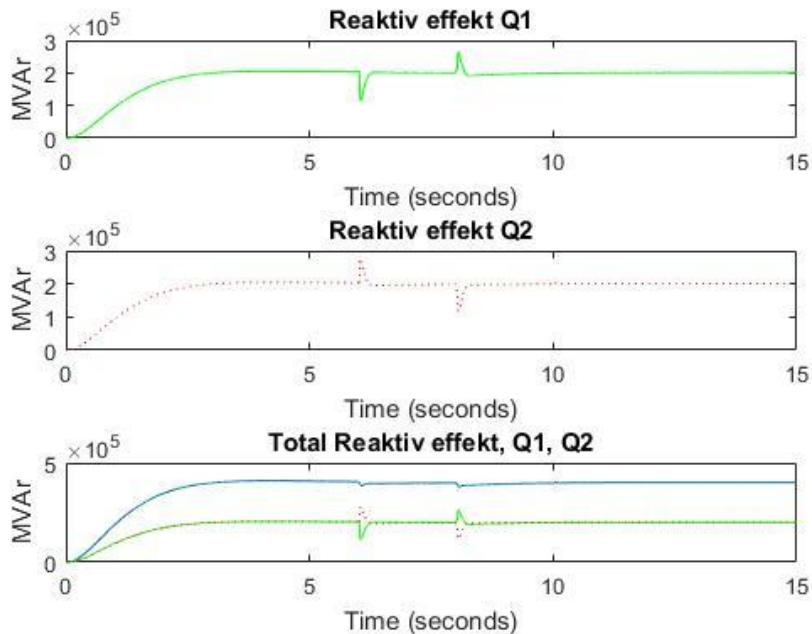


Figur 31 Fall 3 utan pålagda störningar skenspänning

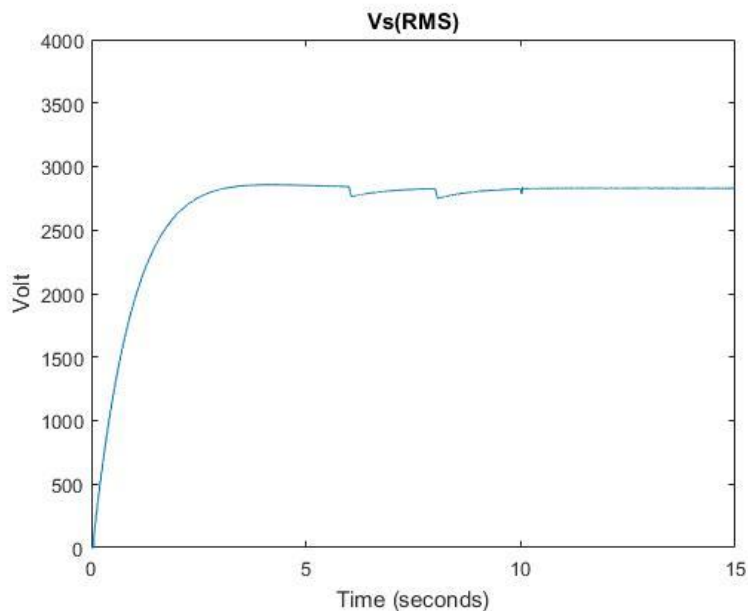
4.3.2 Fall 3 med pålagda störningar

Regleringen av störningarna sker korrekt, felen i fältströmmen hos en av de roterande omformarna ger upphov till en motreaktion i den andra för att hålla den reaktiva effekten konstant och regulatorn styr sedan insignalerna så att två lika stora utsignaler skapas.

Störningen i skenspanningen ger nu ingen märkbar effekt på de reaktiva effekterna. Störningen på skenspanningen kan ses i grafen över skenspanningen som en kort spik vid 10 sekunder men de mest dominerande störningarna är fortfarande de i fältströmmen hos omformarna.



Figur 32 Fall 3 med pålagda störningar reaktiv effekt



Figur 33 Fall 3 med pålagd störning skenspanning

5. Diskussion

I följande avsnitt kommer resultaten att diskuteras utefter tre olika kriterier. Huruvida simuleringsmodellen ger önskad funktion, om lastdelning sker korrekt samt om skenspanningen lyckas kontrolleras till önskad nivå.

5.1 Simuleringsmodell

Första steget är att utvärdera huruvida simuleringsmodellen fungerar. Detta undersöks genom att för hand kalkylera fram den reaktiva effekten och sedan jämföra kalkylerat värde med simulerat värde. I det första fallet används ledningar med längden 1 km.

$$S = V_s * \left(\frac{V_s}{Z_{last}} \right)'$$

$$Z_{last} = (0,184 * 1 + 2,454) + j * (0,208 * 1 + 0) \quad V_s = \frac{4000}{\sqrt{2}}$$

$$S = 3,0137 + j0,2372 [MVA]$$

Förväntat värde blir alltså ca 0,24 MVAr och simuleringarna i fall 1 gav samma värde, se figur 20-21. Från detta kan konstateras att modellen fungerar i detta avseende.

Effektfaktorn är hög, detta då korta ledningar endast kräver en mindre mängd reaktiv effekt.

Detta undersöks även vid fallet med ledningar av längden 40 km.

$$Z_{last} = (0,184 * 40 + 2,454) + j * (0,208 * 40 + 0) \quad V_s = \frac{4000}{\sqrt{2}}$$

$$S = 0,474 + j0,402 [MVA]$$

Förväntat värde vid ledningslängd 40 km blir 0,40 MVAr. Och även detta stämmer bra överens med simuleringarna i fall 3.

Här synes att effektfaktorn är betydligt lägre. Detta då långa ledningar kräver en större mängd reaktiv effekt. Anledningen till att den skenbara effekten har minskat till en lägre nivå än vad tåget kräver är att den totala lasten har ökat utan att en kompensering för det ökade kraftbehovet har skett. Modellen framtagna i detta arbete kan ej öka produktionen av aktiv effekt hos omformarna då endast styrning av rotorkretsen är utvecklad. I modellen kan detta synas genom en förminskad ström ut från omformaren vilket ger för låga värden på den reaktiva effekten. Den verkliga hade varit större med en faktor på ungefär 9.

5.2 Lastdelning

En korrekt lastdelning fördelar den reaktiva effekten jämnt mellan de två omformarna.

Graferna för reaktiv effekt i de olika fallen visar på att en korrekt lastdelning sker i samtliga fall. När störningar läggs på uppstår en obalans i systemet och under den tid det tar för regulatorn att rätta till störningen är lastdelningen ojämn. Den naturliga trögheten i processen gör att ett visst insvängningsförlopp krävs, vilket framgår av graferna. Men det kan också konstateras att inga översvängningar sker vid regleringen och en korrekt lastdelning återupptas utefter de nya förhållandena. Eftersom hastigheten på lastdelningen är beroende av stigtiden för strömmen kommer en utjämning av lastdelningen aldrig att kunna ske snabbare än 1.5 sekunder.

Då de producerade reaktiva effekterna har positiva tecken och samma storlek så cirkulerar inga strömmar mellan omformarna. Det positiva tecknet visar att reaktiv effekt produceras av omformarna.

I fall 2 när parametrarna ändras i omformare 2 kan en viss skillnad iaktas i figur 26. Ett längre insvängningsförlopp kan observeras för omformare 2 men även i detta fall lastdelar den korrekt.

5.3 Skenspänning

Vilket framgår av graferna över skenspänningen i resultatdelen lyckas systemet bibehålla skenspänningen till de önskade effektivvärdet i samtliga fall. Även när störningar förs in lyckas regulatorn hålla börvärdet efter ett visst insvängningsförlopp.

Störningen som förs in direkt på skenspänningen ger i samtliga fall en liten inverkan på utsignalerna jämfört med effekten av störningarna på fältströmmen. Detta beror på att skenspänningen regleras av den yttre loopen och fältströmmen regleras av den inre loopen vilken är snabbare. En reglertid på under en sekund kan uppskattas ur figurerna för regleringen av skenspänningen.

Storleken på omformarna påvisade ingen skillnad sett i lastdelningen, men däremot påverkades rotorspänningarna som krävdes för samma mängd reaktiv effekt.

5.4 Framtida utveckling av arbetet

Då modellen inte kan hantera vridmomentet som rotern bidrar med kan detta vara en uppföljande uppgift. Även en utveckling av reglerparametrarna.

Referenser

- [1] "Sveriges järnvägsnät", Trafikverket.se, 2016. [Online]. Tillgänglig: <http://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/jarnvag/Sveriges-jarnvagsnat/> . Hämtad: 2017-04-29
- [2] N. Biedermann, "Elektrifieringen av Sveriges stadsbanor: Besluten och motiven som ledde till elektrifieringen av statens järnvägsnät", uppsats, KTH Avdelningen för teknik- och vetenskapshistoria Teknikhistoria, allmän översikt (4K1401), KTH, Kista, Sverige, 2002
- [3] *Sveriges järnvägar 100 år*, Järnvägsstyrelsen, Stockholm, 1956
- [4] Trafikverket, "Järnvägens elanläggningar", Trafikverket, Borlänge, Sverige, ISBN: 978-91-7467-588-7, 2014. [Online]. Tillgänglig: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10394/RelatedFiles/100696_Jarnvagens_elanlaggningar.pdf . Hämtad: 2017-04-29.
- [5] N. Biedermann, "Banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar", examensarbete, Institutionen för tillämpad IT, KTH, Stockholm, Sverige, 2006. [PDF]. Tillgänglig: <https://onedrive.live.com/?cid=E0DC0057CBC5D9FE&id=E0DC0057CBC5D9FE%21366&parId=E0DC0057CBC5D9FE%21304&o=OneUp> . Hämtad: 2017-04-29.
- [6] *BVH 543.16001: Beskrivning av olika utföranden på mobila omformare samt tekniska data*, Borlänge, Sverige: Trafikverket, 2003.
- [7] Muntligkälla Lars Christoffersson.
- [8] T. Suneson, "Förslag till nationell plan för transportsystemet 2014–2025: Underlagsrapport – kraftförsörjning av järnväg," Trafikverket, Borlänge, Sverige, TRV 2012/38626, 2013. [Online]. Tillgänglig: http://www.trafikverket.se/contentassets/9e147d1421b14ee9ae83003c9f15617c/underlagsrapport_kraftforsorjning.pdf . Hämtad: 2017-05-03.
- [9] B. Thomas, *Modern reglerteknik*. Uppl. 4, Stockholm, Sverige: Liber AB, 2008.
- [10] *BVF 050: Allmänna elskyddsföreskrifter för Banverkets fasta högspänningsanläggningar* Borlänge, Sverige: Banverket, 1990
- [11] Bild kontrollsystem IETV
- [12] *Underlag til reléplan for Dale, Mjølfjell og Haugastøl omformerstasjoner*, BaneNOR.
- [13] Muntligkälla Malin Fridmar
- [14] Alfredsson, A & Cronqvist, A. "Elkraftshandboken: Elmaskiner", 1st ed, Liber, 1996, pp. 80-101
- [15] 48550 Electrical Energy Technology (2017, May 10). "Synchronous Machines Chapter 6" [Online]. Available: www.services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects_JGZ/eet/eet_ch6.pdf

[16] Slideshare. (2017, May 10). "Synchronous generators" [Online]. Available: www.slideshare.net/tes4/synchronous-generators-72033441

[17] (2017, May 2) "Experiment No. 5 Synchronous machines" [Online]. Available: <http://ecee.colorado.edu/ecen4517/materials/SynchronousMach.pdf>

[18] ENM055 Electric Drives I, (2017 , May 1) "Lecture 5 Synchronous Machines" [Online]. Available: <https://pingpong.chalmers.se/courseId/5739/node.do?id=2482249&ts=1441664971274&u=-758453532>