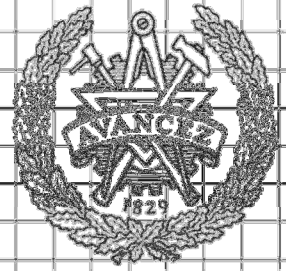


CHALMERS



Design och utvärdering av power system stabilizer i synkrongenerator

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik

Amanda Sadri

Institutionen för energi och miljö
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2011

Sammanfattning

I denna rapport redovisas en synkronmaskinsmodell för simuleringsprogrammet Simulink/MATLAB. Modellen är baserad på synkronmaskinekvationer vilken har induktanser och resistansen av rotor respektive stator som parametrar. Dessa refereras som fundamentala parametrar och identifieras med element i d och q axlar. Det vill säga maskinmodellen bygger på en tillståndsmodell i dq -systemet enligt Park Modellen. Denna maskinmodell har en extern fältlindningsmatning typ DC1A vilken är standardiserade av IEEE.

Maskinen är vidare konstruerad för att vara kopplad till ett starkt nät.

För att undersöka hur systemstabiliteten påverkas, implementeras en dämp tillsats (eng. power system stabilizer, PSS). PSS:en har rotorhastighetsavvikelse som insignal och utsignalen skickas till magnetiseringsutrustningen vilken i sin tur påverkar generatorns elektriska vridmoment.

Simulink- modellen testas med varierande parametrar för att testa stabiliteten i systemet utan respektive med PSS för att få önskade resultat.

Förord

Detta examensarbete har utförts för högskoleingenjörsutbildningen i elektroteknik vid Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet var både intressant och givande och gav mig en fördjupad bild av synkrongeneratorn och stabilitet som var helt nytt område för mig.

Jag vill tacka min handledare Massimo Bongiorno vid institutionen för elkraftsystem, Chalmers Tekniska Högskola.

Ett stort tack går till min examinator Stefan Lundberg vid institutionen för elkraftsystem, Chalmers Tekniska Högskola för hans inspirerande, pedagogiska och tålmodiga hjälp och vägledning.

Symbolförteckning

Beteckning	Benämning
Ψ_d	Stator flöde i d-led
Ψ_{fd}	Fältflöde
Ψ_{rd}	Dämplindningsflöde i d-led
Ψ_{rq}	Dämplindningsflöde i q-led
Ψ_q	Stator flöde i q-led
E_f	Magnetiseringsspänning
L_{rfd}	Fältlindningens induktans
L_l	Statornsläckinduktans
L_{rd}	Dämplindning induktans i d-led
L_{rq}	Dämplindning induktans i q-led
L_{md}	Magnetisering induktans i d-led
L_{mq}	Magnetisering induktans i q-led
T_e	Elektriskt moment
T_{mech}	Mekaniskt moment
E_b	Nätspänning
V_{fd}	Fältspänning till generator
i_{sd}	Stator ström i d-led
i_{sq}	Stator ström q-led
i_{rd}	Dämplindningsström i d-led
i_{rq}	Dämplindningsström i q-led
R_s	Statorsresistans i d-led
v_d	Statorspänning i d-led
v_q	Statorspänning i q-led
ω_{rm}	Mekaniskhastighet av rotor
ω_s	Synkron vinkelhastighet
P	Antal poler
H	Tröghetskonstant
J	Mekanisk tröghet
θ	Vinkel

Samtliga enheter är p.u

Innehållsförteckning:

1. Inledning.....	1
1.1 Problembakgrund.....	1
1.2 Syfte	1
1.3 Rapportdispositionering.....	1
2. Teori	2
2.1 Simulering	2
2.2 Synkrongeneratorn	2
2.3 Stabilitet.....	2
2.4 Magnetiseringsystem	3
2.5 PSS-Power System Stabilisator	4
3. Metod	5
4. Simulinkmodell	6
4.1 Synkrongeneratorrekvationer.....	6
4.2 Synkrongeneratormodellen.....	9
4.3 Magnetiseringmodellen typ DC1A.....	11
4.4 PSS-modellen	12
5. Simulering	17
5.1 konstantmagnetisering	17
5.2 Magnetisering med typ DC1A(utan PSS).....	19
6. Effekten av PSS	20
6.1 PSS typ 1	20
6.1 PSS typ 2	21
7. Oscillationsfrekvensändring.....	24
8. Diskussion	26
9. Slutsatser	27
Referenser.....	28
Bilagor.....	29
Bilaga A: d-q transformation.....	29
Bilaga B: Modell över synkrongenerator i simulink	31
Bilaga C: Synkrongenerator parametrar.....	32
Bilaga D: Parametrar till PSS överföringsfunktioner	33
Bilaga E: Parametrar till magnetiseringssystem	34

1 Inledning

1.1 Problembakgrund

När effektöverföring svänger mellan olika delar av ett kraftsystem och energiöverföringen inte är konstant då uppstår effektpendlingar i kraftsystemet. Svängningarna i generators rotor orsakar dessa pendlingar. För att dämpa dessa svängningar i kraftverket används dämptillsatsen (eng. Power System Stabilizer, PSS). Under senare år har modern kontroll teori tillämpats för att öka stabilitet i ett kraftsystem samt lösa dämptillsatsens designproblem. Detta har bidragit till att stärka den dynamiska stabiliteten för kraftsystemet.

1.2 Syfte

Syftet med det här examensarbetet var att implementera och simulera dämptillsatsen för synkrogeneratorer.

En stabiliseringsregulator implementeras i en synkrogenerator kopplad till ett starkt nät. Stabilisatorns uppgift är att motverka svängningarna i det elektriska vridmomentet och den aktiva effekten genom att påverka magnetiseringsspänningen och på så sätt magnetiseringsströmmen till generatoren.

1.3 Rapportdisposition

Rapporten inleds med inledande teori i kapitel 2 där synkrogenerators effekt på instabilitet samt stabilitet problemen och en kort genomgång av dämptillsats funktion.

I kapitel 3 finns metoden som har utförts för att testa stabiliteten samt dämpa svävningar. I kapitel 4 finns simuleringsmodell samt modalanalys beskriver där detaljerad uppbyggnad av synkrogeneratoren för simulering, samt olika delar av magnetiseringssystemet typ DC1A och PSS överföringsfunktioner finns redogjord. Medan det i kapitel 5 finns en beskrivning av testsimulering av synkrogeneratoren utan och med magnetiseringssystemet. I kapitel 6 undersöks koppling av en PSS till systemet. Där studeras även möjligheterna av PSS:en att öka dämpningen. I följande kapital undersöks även en andra modell av en PSS som ska den öka dämpningen i ett bredare frekvens område av oscillationsfrekvenser. I kapitel 7 ändrades oscillationsfrekvensen för ytterligare undersökning av PSS:er dämpningsförmåga. I slutligen finns slutsatsen. Sist i rapporten finns en litteraturförteckningar samt fyra appendix som innehåller information som kompletterar rapporten.

2 Teori

Rapporten består av en teoridel som förklarar teoretiska bakgrunden för projektet.

2.1 Simulering

Användning av Simulink/ Matlab för att bygga och simulera hela systemet skulle vara målet med denna avhandling. Systemet bör bestå av synkronmaskin-modellen med ett magnetiseringssystem och styrmodell som dämptillsatsen.

MATLAB är ett generellt matematisk programverktyg som ger redigering, plottning, felsökning och grafiska funktioner. Simulink är ett programpaket designat för att köras i MATLAB och kan användas för modellering, simulering och analys av dynamiska system.

2.2 Synkrogenerator

En synkrogenerator är en roterande AC maskin som omvandlar mekanisk energi till elektriskt energi. Mekanisk energi kan t.ex. komma från en turbin i ett kraftverk. Generatoren består av två mekanikdelar, en trefasig stator med ankarlindningar och en rotor med fältlindning samt dämplindning. Trots förluster, är effektiviteten i en synkrogenerator ganska hög, uppemot 99%.⁵ Den höga verkningsgraden är en anledning till att synkrogeneratorerna används särskilt för stora kraftsystem, exempelvis turbingeneratorer, kärnkraftverk och vattenkraftverk.

Synkrogeneratoren är den kanske viktigaste komponenten vid studier av elektromekaniska oscillationer i ett kraftsystem. Rotorn roteras av turbinen och magnetiseras genom magnetiseringssystemet som består av en magnetiseringslindning och en spänningsregulator. Det roterande magnetiska flödet i rotorn inducerar en spänning i varje statorlindning. Synkrogeneratoren roterar med synkron vinkelhastighet ω_s . Den synkrona vinkelhastigheten beror på antalet poler och nätfrekvensen.¹

2.3 Stabilitet

Stabiliteten i ett system definieras som en förutsättning och förmåga av systemet för att åstadkomma och återställa jämvikt mellan motsatta krafter.¹

Kraftsystemets synkrona stabilitet brukar studeras utifrån ett turbin- generator axelmoment. Ett starkt nät eller flera maskiner kopplade till kraftsystemet används vanligtvis för undersökning av stabiliteten. Kraftsystemets svängningar kan delas in i lokala svängningar mellan en enhet och resten av kraftstationer i frekvensordningen 0,8-4,0 Hz, inter-plant svängningar sker mellan två elektriska nära produktionsanläggningar i storleksordningen 1,0 till 2,0 Hz och inter-area oscillationer som uppstår när hela nätet svänger över långa avstånd i

frekvensordningen 0,2 till 0,8Hz¹. Dämpningen av dessa svängningar sker genom användning av en PSS som finns installerat i många kraftverk³.

2.4 Magnetiseringssystem

Magnetiserings grundfunktion är att mata synkrogenerators fältlindning med en likström. Dessutom utför den kontroll och skyddsfunktioner som är avgörande för ett tryggt och säkert kraftsystem genom kontroll av fältspänningen och fältströmmen. Kontroll funktionen innebär kontroll av spänningen, reaktiv effekt och stabilitet i systemet. Skyddsfunktioner ser till att begränsningar för synkrogeneratoren, magnetiseringssystemet och andra utrustningar inte överskridas.

IEEE presenterade olika standardiserade modeller av synkrogenerators magnetiseringssystem. Dessa modeller fungerar som referens för tillverkare och system analytiker genom att upprätta en gemensam nomenklatur som ger vägledning för specifikationer och testning.²

Det finns tre typer av magnetiseringssystem enligt IEEE-rapporten [IEEE St. 421.5-2002]:

Typ DC Magnetiseringssystem

Typ AC Magnetiseringssystem

Typ ST Magnetiseringssystem

Denna rapport koncentrerar sig på DC magnetiseringssystem. DC magnetiseringssystem är den enklare och äldre modellen som används mest i industriella området. I Figur 2.4.1 visas modellen DC1A (IEEEEX1)². Modellen består av en spänningsregulator som presenteras med tre block av överföringsfunktioner och DC magnetiseringen som presenteras med ett lågpasfilter block med mätnadsfunktion.

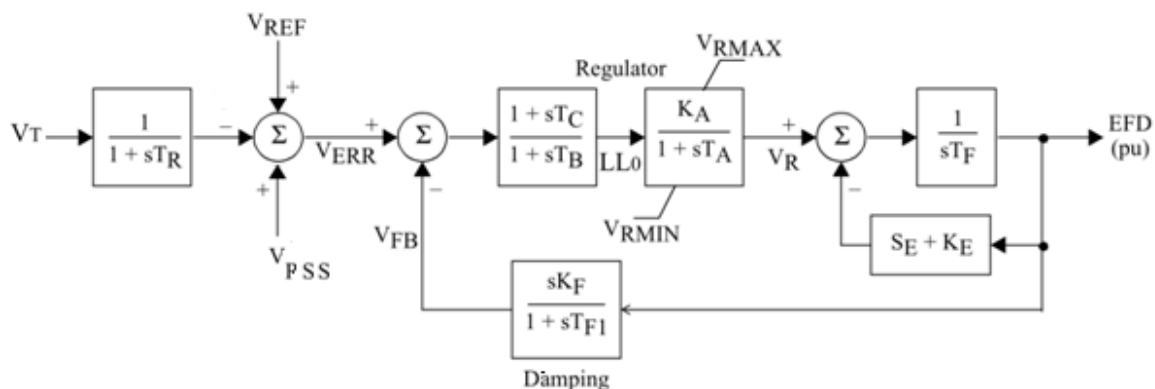


Figure 2.4.1 – Block diagram av IEEEEX1 dynamik modell².

2.5 PSS- Power System Stabilisator

En PSS:s grundfunktion är att dämpa oscillation i generatorns rotor genom att kontrollera rotormagnetiseringen. För att genomföra dämpningen, produceras en komponent via rotorns magnetiseringssystem i det elektriska vridmoment som är i fas med rotorhastighetens avvikelse. När rotorn pendlar fungerar detta moment som ett dämpande moment för att motverka svängningar.

Insignalen till PSS:en kan väljas med hänsyn till ett antal nyckelfaktorer. Frekvens, elektrisk effekt, accelererande effekt och hastighetsavvikelse kan användas som insignaler.

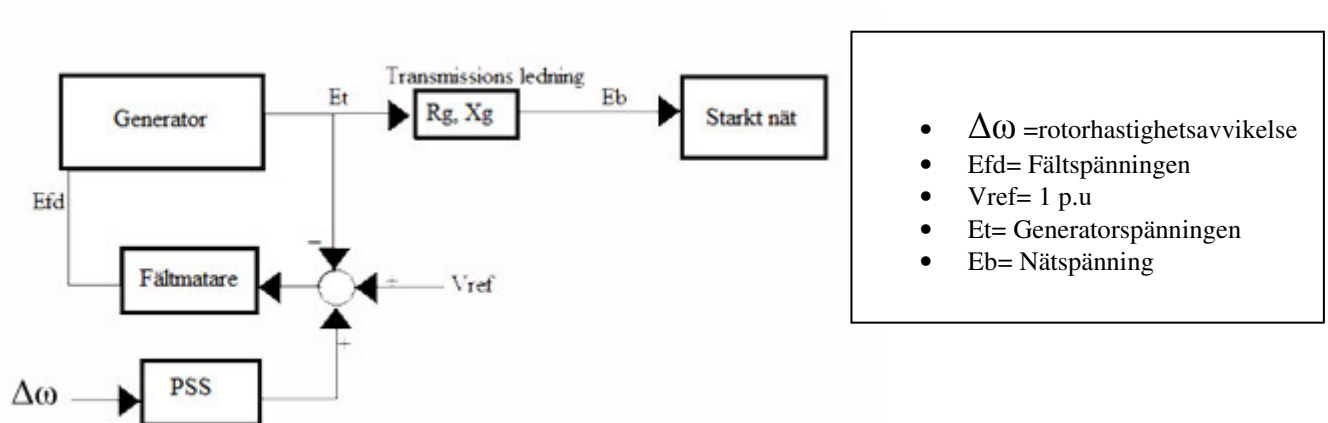
Så länge avsikten är att producera en vridmomentkomponent, är det logiskt att använda rotorns hastighetsavvikelse som insignal till PSS:en.

PSS:en kan representeras med följande block: förstablocket är en förstärkning, det andra är ett hög-passfilter så kallad *wash-out* filter och tredje är ett *lead-lag* filter som kan användas ett antal av detta filter i följd ¹.

3 Metod

I denna avhandling skall modellen enligt Figur 3.1 byggas upp i Simulink, som sedan simuleras och valideras. Synkrongeneratorm som är utrustad med en fältmatning och en PSS regulator kopplas till ett starkt nät. Där kan den undersöka effekten av PSS:en för synkront stabilitet med justering av parametrar.

Ett starkt nät (eng. infinite bus) är ett nät där spänningens storlek (E_b) och vinkel är konstanta oberoende av last.



Figur3.1. Simulink-modellen över systemet som ska implementeras i denna rapport, fältmatare är den likströmmagnetisering som magnetiserar rotorn och en spännings signal från PSS:en går till fältmatningen för att dämpa oscillationen.

4 Simulink modell

I det här avsnittet visas hur olika delar av systemet som synkrongenerators, magnetiseringssystemet, PSS:en implementeras i Simulink. Dessutom beskrivs i det här avsnittet insättning av parametrarna till dessa olika delar av systemet.

4.1 Synkronmaskinekvationer

Synkronmaskins ekvationer innehåller induktanstemer som varierar med vinkeln θ som i sin tur varierar med tiden. Detta innebär komplexitet i att lösa stabilitetsproblem i ett kraftsystem. Genom att dela upp stator och rotorvariabler i två axlar, d och q , blir induktanserna i de dynamiska ekvationer konstanta. Dessa axlar är vinkelräta mot varandra, och därför finns det ingen interaktion.

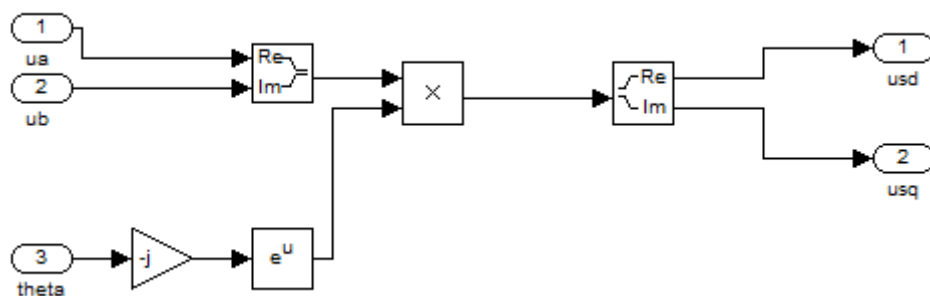
Insignal till synkrongenerators är trefasiga spänningar från nätet. Dessa måste transformeras till dq -koordinatsystem med Parktransformations ekvation, denna transformation samt ekvationer som har använts förklarar i bilaga A. Parktransformation ekvationen kan skrivas i följande matris form:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4.1.1)$$

Figurer 4.1.1 och 4.1.2 visar denna transformation i Simulink.



Figur4.1.1. Trefas a,b,c transformation till alpha.beta.



Figur4.1.2. alpha-beta transformation till d-q.

Stator och rotor spänningsekvationerna i dq -systemet framgår av följande samband:

$$v_d = -R_s i_d - \Psi_q \omega_r + \frac{d}{dt} \Psi_d \quad (4.1.2)$$

$$v_q = -R_s i_q + \Psi_d \omega_r + \frac{d}{dt} \Psi_q \quad (4.1.2)$$

$$v_{fd} = \frac{d}{dt} \Psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (4.1.3)$$

$$0 = \frac{d}{dt} \Psi_{ld} + R_{rd} i_{rd} \quad (4.1.4)$$

$$0 = \frac{d}{dt} \Psi_{lq} + R_{rq} i_{rq} \quad (4.1.5)$$

De magnetiska kopplingarna mellan lindningarna i d -led, L_{rfd} och L_{md} , förutsätts vara lika. Statorinduktanserna i d -led och q -led definieras enligt:

$$L_{sd} = L_{md} + L_l \quad (4.1.6)$$

$$L_{sq} = L_{mq} + L_l \quad (4.1.7)$$

$$L_{rfd} = L_{md} \quad (4.1.8)$$

Flödesekvationerna i dq -systemet framgår av följande samband:

Stator fält ekvationer:

$$\text{Statorflöde i } d\text{-led} \quad \Psi_d = -(L_{md} + L_l) i_d + L_{md} i_{fd} + L_{md} i_{rd} \quad (4.1.9)$$

$$\text{Statorflöde i } q\text{-led} \quad \Psi_q = -(L_{mq} + L_l) i_q + L_{mq} i_{rq} \quad (4.1.10)$$

Rotor fält ekvationer:

$$\text{Fältlindningsflöde} \quad \Psi_{fd} = L_{rfd} i_{fd} + L_{md} i_{rd} - L_{md} i_d \quad (4.1.11)$$

$$\text{Dämpningsflöde i } d\text{-led} \quad \Psi_{ld} = L_{md}i_{fd} + (L_{ld}+L_{md})i_{rd} - L_{md}i_d \quad (4.1.12)$$

$$\text{Dämpningsflöde i } q\text{-led} \quad \Psi_{lq} = (L_{lq}+L_{mq})i_{rq} - L_{mq}i_q \quad (4.1.13)$$

Moment ekvation:

Det elektriska momentet T_{el} och motorns tröghetsmoment J och det mekaniska momentet T_m kan beskrivas enligt:

$$T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \quad [\text{p.u}] \quad \text{Elektriskmoment ekvation} \quad (4.1.14)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (4.1.15)$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_m}{S_{bas}} \quad (4.1.16)$$

$$2H \frac{d\Delta\omega_{el}}{dt} = T_{m[p.u]} - T_{e[p.u]} \quad [\text{p.u}] \quad (4.1.17)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega_{el} \quad (4.1.18)$$

$$2H \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad [\text{p.u}] \quad (4.1.19)$$

Tröghetsmomentet J (kgm^2) i normerad form definieras av H (MWs/MVA) som är tröghetsmomentkonstant enligt ekvation 4.1.16.

Dessa ekvationer kan skrivas i matris form enligt:

$$U = R_{\text{matris}} I + L_{\text{matris}} \frac{dI}{dt} \quad (4.1.20)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & L_{sq}\omega_r & 0 & 0 & -L_{mq}\omega_r \\ -L_{sd}\omega_r & -R_s & L_{md}\omega_r & L_{md}\omega_r & 0 \\ 0 & 0 & R_{rfd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{rq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_{sd} & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & -L_{sq} & 0 & 0 & L_{mq} \\ -L_{md} & 0 & L_{rfd} & L_{md} & 0 \\ -L_{md} & 0 & L_{md} & L_{rd} & 0 \\ 0 & -L_{mq} & 0 & 0 & L_{rq} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{matris}} = \begin{bmatrix} -R_s & L_{sq} \omega_r & 0 & 0 & -L_{mq} \omega_r \\ -L_{sd} \omega_r & -R_s & L_{md} \omega_r & L_{md} \omega_r & 0 \\ 0 & 0 & R_{rfd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{rq} \end{bmatrix}$$

$$L_{\text{matris}} = \begin{bmatrix} -L_{sd} & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & -L_{sq} & 0 & 0 & L_{mq} \\ -L_{md} & 0 & L_{rfd} & L_{md} & 0 \\ -L_{md} & 0 & L_{md} & L_{rd} & 0 \\ 0 & -L_{mq} & 0 & 0 & L_{rq} \end{bmatrix}$$

4.2 Synkrongeneratormodell

Synkronmaskinen är implementerad som en S-funktion som är ett programmerbart Simulink-block, i princip löser det differentialekvationer. Ekvationen 4.1.20 skrivs i tillståndsmodellform i S-funktionen, som kan lösa ut strömmarna.

Insignaler till S-funktionen består av fyra signaler. Två av signalerna motsvarar spänningar i d - q axlar som dynamiska signaler. De två andra signalerna motsvarar fältspänningen som förklaras senare i PSS-modellen (4.4) och det mekaniska momentet som i denna avhandling ges som ett steg.

Utsignalsvektorer som är tillstånds variabler i S-funktionen är: statorströmmarna i_{sd} , i_{sq} , fältströmmen i_{rfd} , rotorvinkelhastigheten w_r , lastvinkeln δ samt det elektriska momentet T_e .

E_t och E_b är ytterligare utsignaler i denna modell. E_t är spänningen från synkrongeneratoren och E_b är spänningen som matar det starka nätet, denna har transmissionslednings resistans och impedans med i sina ekvationer.

Simulinkmodellen över synkrongeneratoren i S-funktionen kan ses i figur 4.2.1.

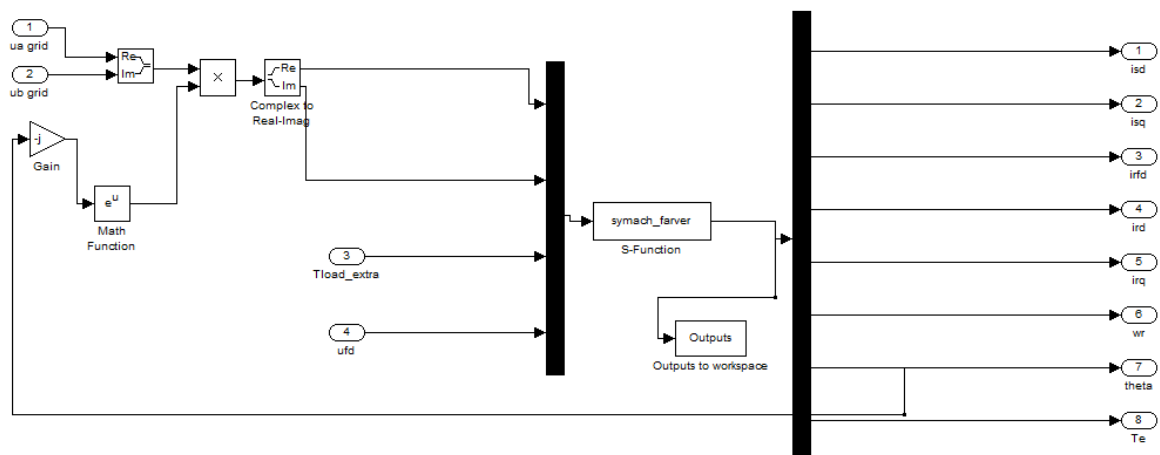
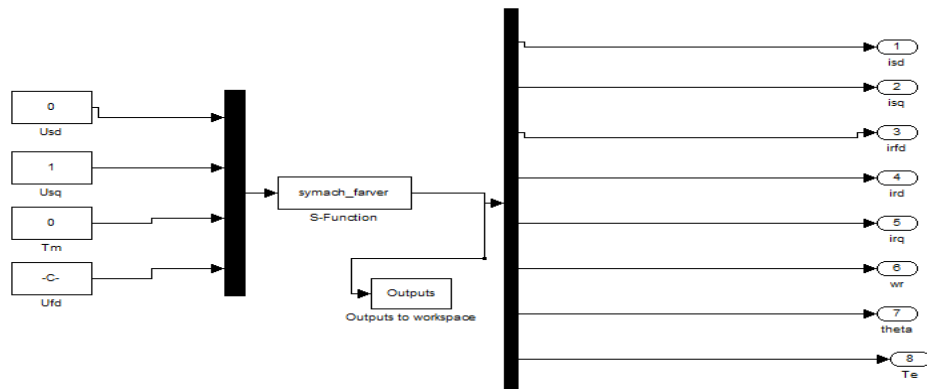


Figure 4.2.1 – Block diagram av synkrongeneratoren med insignaler och utsignaler.

För att komma igång med simuleringarna så testades först maskinmodellen i Simulink i det stationära tillståndet enligt Figur 4.2.2. Maskinens ekvationer sätts i motorreferens systemet med spänningen i d -led lika med noll samt spänningen i q -led är 1 p.u. Ingen mekanisk effekt tillförs till maskinen och magnetiseringen sätts till ett konstant värde, vars beräkning förklaras senare i 5.1.



Figur4.2.2. PSS Bodediagram, i den undre kurvan.

Resultatet visa i Figur 4.2.3, där vi kan se att rotorvinkelhastigheten blir ett konstant värde, lika med 1 p.u, vilket är lika med det synkrona varvtalet.

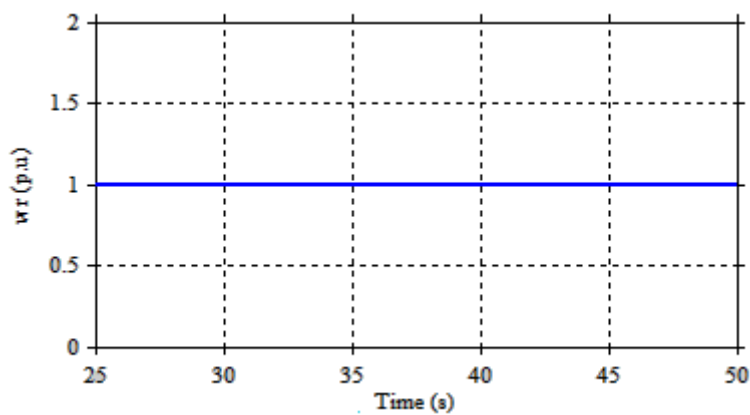
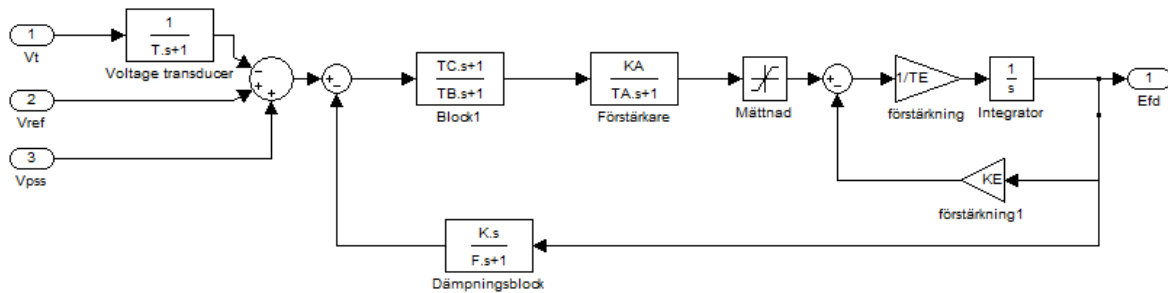


Figure 4.2.3 Rotoravvikelsehastighet.

4.3 Magnetiseringsmodellen typ DC1A

Följande avsnitt beskriver magnetiseringen DC1A. Den förenklade modellen i Simulink illustreras i Figur 4.3.1.



Figur4.3.1. Förenklade modell av DC1A i simulink

I Figur 4.3.1, första blocket efter terminalspänningen kallas ett *voltage transducer* block. För vissa system kan det finnas olika tidskonstanter i samband med funktioner av spänningsavläsning (eng. voltage sensing) och lastkompensationen. När lastkompensationen inte används, för modelleringssyfte kan blockschemat reduceras till ett enkelt block med en tidskonstant T_R vilken är mycket liten, mellan 0,01 till 0,02 och därmed kan den sättas till noll.

Terminalspänningen V_T som är absolutbeloppet av generatorspänningen i d -led och q -led, jämförs med en referensspänning V_{ref} som representerar den önskade terminalspänningen och här är 1p.u, då V_T blir subtraherad från V_{ref} .

Därefter summeras V_{pss} vilken är den stabiliserande utsignalen och sedan förstärks den resulterande signalen i regulatorm. I det stationära tillståndet V_T och V_{pss} är lika med nollor, vilket innebär att endast felsignalen av terminalspänningen blir kvar.

Tidskonstanterna T_B och T_C kan användas för att modellera motsvarande tidskonstanter i inbyggda i spänningsregulator. De är ofta tillräckligt små för att kunna försummas.

Spänningsregulatorn innehåller en förstärkare som kan vara av magnetisk, rotations eller elektronisk typ. De magnetiska och elektroniska typerna har en förstärkning och en tidskonstant. De kan representeras som blocket förstärkare i Figuren 4.3.1 med tidskonstanten T_A och förstärkningen K_A som har stor betydelse i spänningsregulatorn funktion, dessutom innehåller blocket en begränsare för dess mätnad.

Magnetiseringssystemet innehåller även en stabiliserande eller dämpning krets som kan vara återkopplad eller i serie med systemet. I de flesta magnetiseringssystemet används serie transformatorer för att förverkliga stabiliserande funktionen. Dämpningskretsen representeras som dämpningsblocket med förstärkningen K_F och tidskonstanten T_{F1} .

Spänningsregulator utsignal används för att kontrollera fältmatningen² vilken antingen är separatmagnetisering eller så kan den magnetisera sig själv.

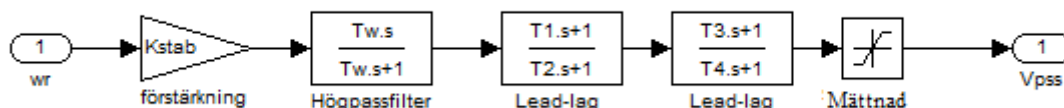
I ett separat magnetiseringssystem, K_E kan beräknas så att spänningsregulatorns utsignal blir noll i initialt tillstånd. För själva magnetiseringssystemet kan K_E sättas till ett. Tidskonstanten T_E har valts efter justering av systemet funktion.

För inmatningen till dessa parametrar används standardvärden från IEEE (referens2). Resultatet var inte som det önskades, elektriskt momentet och rotorvinkelhastigheten hade stora oscillationer och efter 100 sekunder hade dessa oscillationer ej avklingat och generatorn kunde inte gå till stationärt tillstånd. Därmed var det visat att parametrarna inte var användbara för denna modell av synkrogeneratorn, med valda synkrogeneratorns parametrar som induktanser och resistanser. Därefter justerades parametrarna med olika fall.

4.4 PSS-modellen

En PSS kan representeras som ytterligare ett kontrollblock som används för att förbättra systemets stabilitet. Detta block läggs till spänningsregulator insignal vilket är insignal till fältmatningen.

De tre grundläggande blocken med en typisk delta- omega PSS modell, illustreras i Figur 4.4.1.



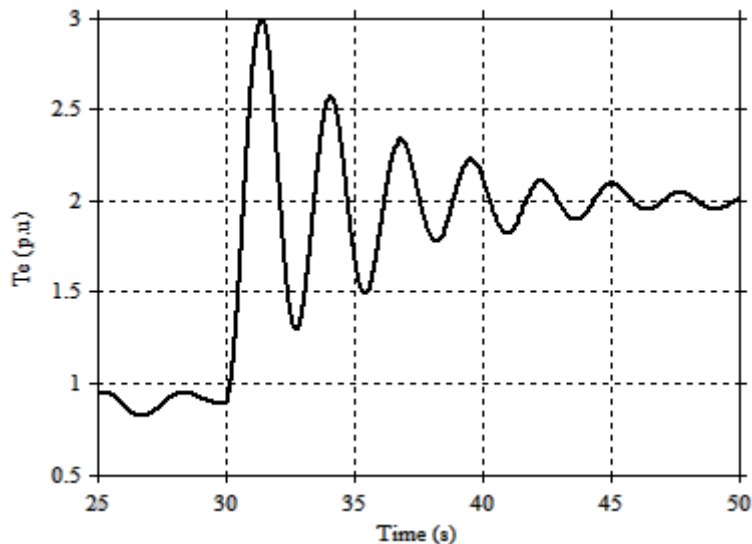
Figur4.4.1. Block diagram av PSS typ 1.

Överföringsfunktion för denna PSS blir:

$$G_{pss}(s) = K_{stab} \frac{T_w s}{T_w s + 1} \cdot \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \cdot \frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1} \quad (4.4.1)$$

Det första blocket är stabilisatorns förstärkning vilket avgör hur mycket dämpning behövs av de intressanta svängningarna.

Figuren 4.4.2 visar svängningar i det elektriska vridmomentet, dessutom kan oscillationsfrekvensen beräknas från figuren för detta fall.

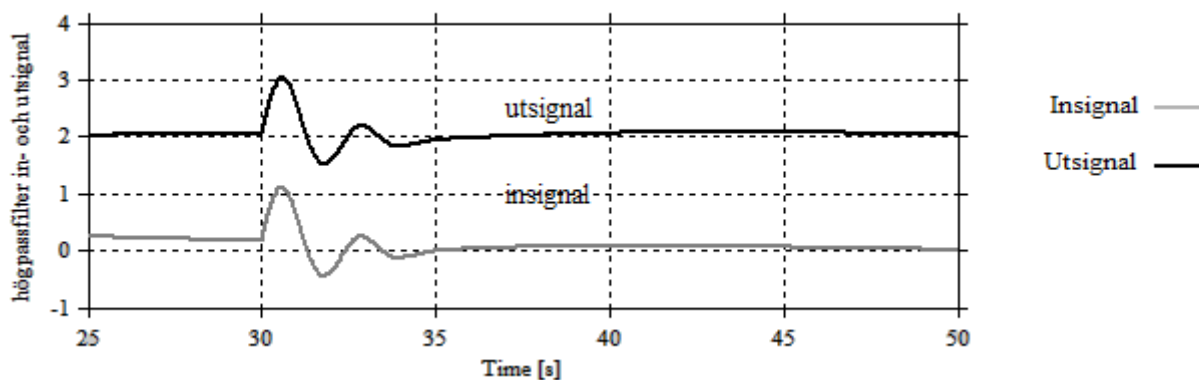


Figur4.4.2. Elektriskt vridmoment med svängningar.

Vi ser att frekvensen av oscillationen är $2,89 \text{ rad/s}$ ($0,461 \text{ Hz}$). Det betyder att oscillationen är av inter-area typ.

Högpasstret i PSS:en som visas i Figur 4.4.1 används för att blockera stationära och för att släppa igenom pendlingar oförändrade. Det vill säga att i stationära tillståndet är utsignalen av detta filter oförändrad. Genom att välja en hög tidskonstant T_w , skall högpasstret inte ha någon effekt på färförskjutningen. Värdet av tidskonstanten T_w är inte kritisk och kan väljas mellan 1 till 20 sekunder. För typ lokal oscillation som har ett frekvensområde mellan $0,8\text{-}2 \text{ Hz}$ är tidskonstanten $1,5 \text{ s}$ tillfredställande. För typ inter-area oscillationen kan tidskonstanten T_w väljas mellan 10 till 20 sekunder. I exemplet ovan var oscillationsfrekvensen $0,461 \text{ Hz}$ enligt Figur 4.4.2 och då valdes T_w till 10 sekunder men efter implementering av lead-lag blocken visade sig att den var för hög då och efter justerades då till T_w 4 sekunder.

Figuren 4.4.3 visar inputsignalen som är rotorhastighetsavvikelse och outputsignalen vars stationära tillstånd inte förändrar insignalen. Dessutom högpasstret orsakar några grader fasskiftning i outputsignalen. Detta kan vara på grund av det låga värdet för tidskonstanten T_w .



Figur4.4.3. Högpastfilter (input och output signaler).

Det sista blocket är lead-lag blocket, som ger den önskade faskompenseringen för att kompensera fasskillnaden mellan spänningsregulatorns ingång och generatorm elektriska vridmomentet, i praktiken kan två eller fler första ordningens block användas för att uppnå den önskade faskompenseringen. För att dämpa rotors oscillation måste PSS:en producera en komponent av elektriskt vridmoment som är i fas med rotorvinkelhastighets avvikelse.

För att bestämma faskompensationen, den kan räknas ut med hjälp av faskurvan mellan fältmatningens indata och det elektriska vridmomentet med hjälp av tillståndsvektorer. Parametrarna för dämptillsatsen kan bestämmas utifrån en linjär modell av elsystemet¹, i detta arbete den linjära modellen och tillståndsvektorerna studeras inte.

Eftersom synkrogeneratorm är kopplad till ett starkt nät som har en konstant vinkel lika med noll antogs fasskillnaden vara 90°. Då valdes tidskonstanter för PSS:en så att de ger en negativ fasskillnad på 90°.

Lead- filtret har följande överföringsfunktion enligt ekvation 4.4.2:

$$G(s) = \frac{aTs+1}{Ts+1} \quad (4.4.2)$$

Mittfrekvensen för lead- filtret är :

$$\omega = \frac{1}{T\sqrt{a}} \quad (4.4.3)$$

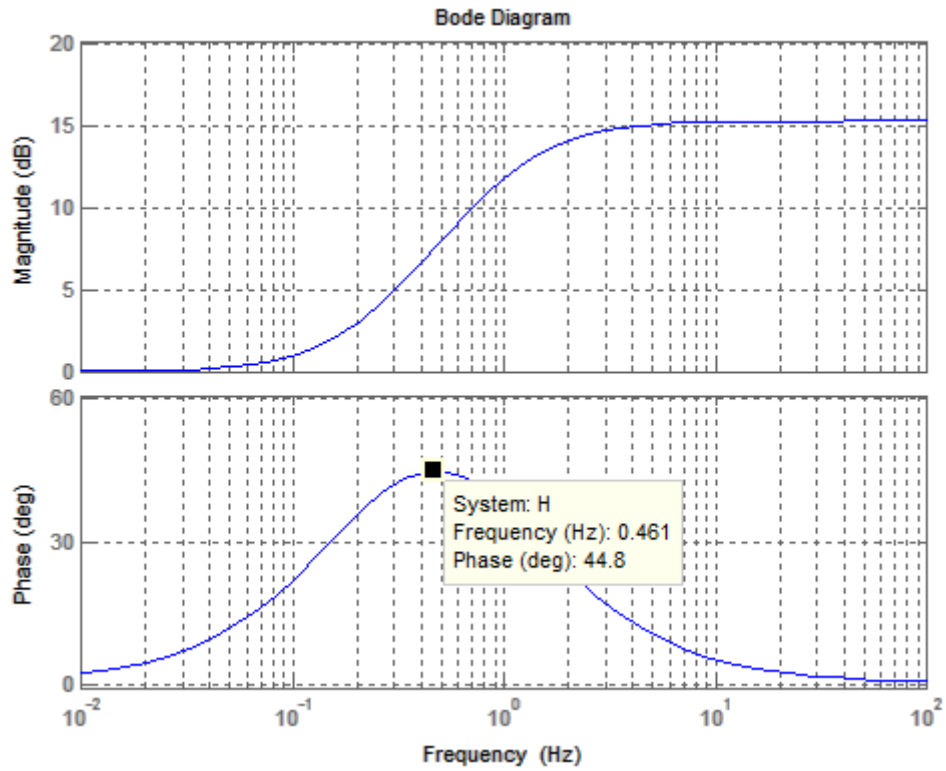
Där $\omega = 2.89 \text{ rad/s}$.

För dimensionering av lead-filtret väljs först leadkvoten a med fasmarginalen 45 grader enligt:

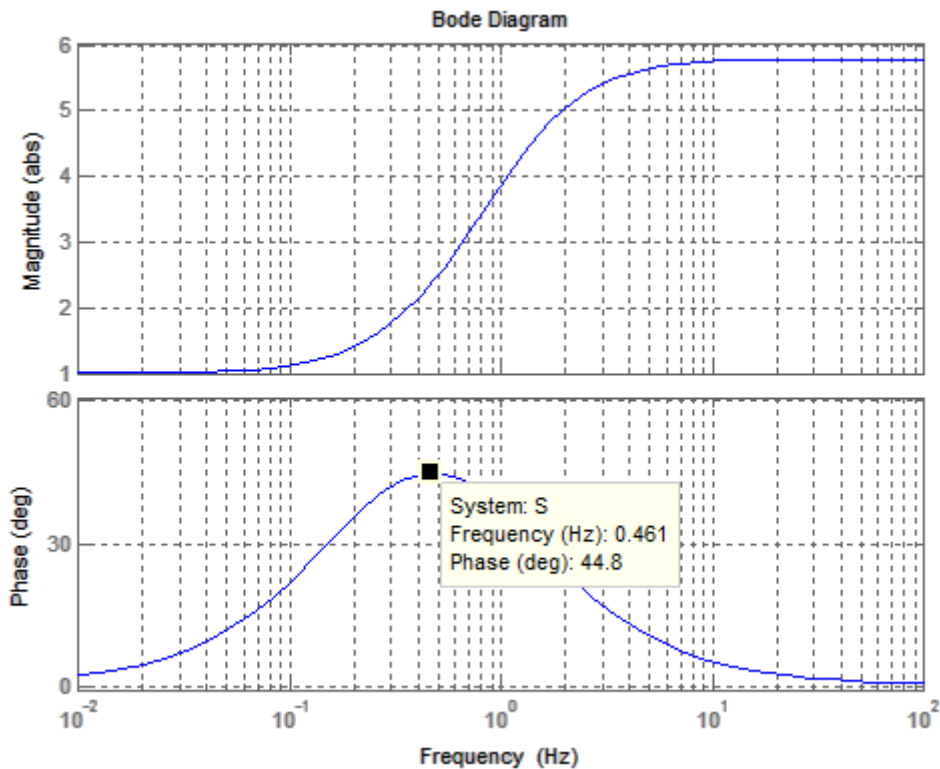
$$\sin \phi_m = \frac{a-1}{a+1} ; \quad \phi_m = \text{maximum av faskompensationen} \quad (4.4.5)$$

(4.4.5) ger $a = 5,78$, ω fås från Figur 4.4.2 och ger med hjälp av (4.4.2) till $T = 0,14$ sekunder.

Figurer 4.4.4 och 4.4.5 visar Bodediagrammet med magnituds kurva (förstärknings) och faskurvan för första och andra lead-lag blocken.



Figur4.4.4. Första Lead-Lag filters Bodediagram, i den undre kurvan som är faskurvan kan ses att fasskillnaden är 44.8° vid frekvensen 0,461 Hz.

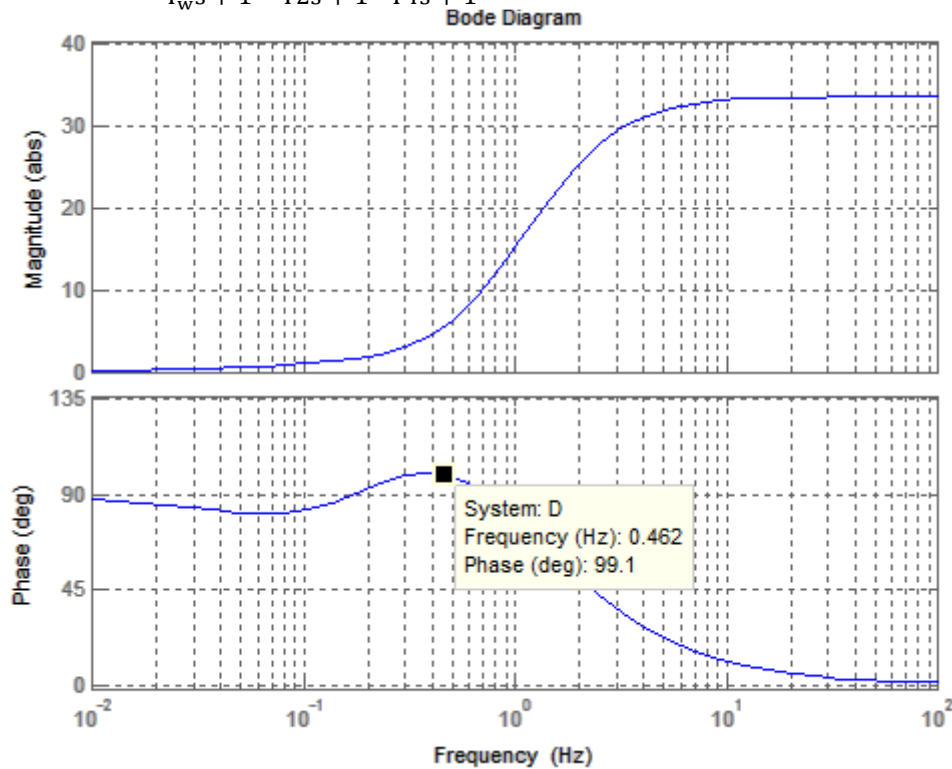


Figur4.4.5. Andra Lead-Lag filters Bodediagram, i den undre kurvan som är faskurvan kan ses att fasskillnaden är 44.8° vid frekvensen 0,461 Hz.

I figurer 4.4.6 ses Bode diagrammet för sammanlagda överföringsfunktion i PSS:en.

Den sammanlagda överföringsfunktionen är:

$$G_{\text{pss}}(s) = K_{\text{stab}} \frac{T_w s}{T_w s + 1} \cdot \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \cdot \frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1}$$



Figur 4.4.6. PSS Bodediagram, i den undre kurvan som är faskurvan visar den markerade punkten att fasskillnaden är 99° vid frekvensen 0,461 Hz.

Det som framgår av Figur 4.4.6 är att för frekvensen 0,416 Hz har signalen en fasförskjutning på 99 grader, det betyder att den motverkar instabilitet vid denna frekvens av oscillationen, resultatet av implementeringen av PSS:en visas i avsnitt 6.1.

Sista blocket i Figur 4.4.1 begränsar PSS:ens utsignal för att utsignalen från stabilisatorn inte skall riskera spänningsregulatorns funktion samt magnetiseringsutsignalen som styr generatorn utspänningen. En vanlig gräns för utsignalen är ±5 % av spänningsregulatorns referensspänning.¹

5 Simulering

Synkrongeneratormodellen med olika magnetiseringssystemen som simulerades under projektets gång visas här nedan, teoriska aspekter av simuleringen diskuteras sen i diskussionsavsnittet.

5.1 konstant magnetisering

I första simuleringen har modellen inget styrsystem. Magnetiseringen till synkrongeneratormodellen anses vara konstant värde, E_{f0} . Stator spänningen i d -led blir lika med noll i det stationära tillstånd och statorspänningen i q -led som är ett komplex värde blir lika med en p.u.

$$E_t = V_d + jV_q \quad (5.1.1)$$

$$V_q = 1 \text{ p.u.}$$

Rotorns dämpvindningar har ingen effekt i det stationära tillståndet av generatormodellen, därför tas inte hänsyn till dessa. I detta tillstånd gäller att $i_q = i_d = 0$ samt att derivatan av dem är lika med noll, då blir statorspänningens ekvationer 4.1.1 och 4.1.2 :

$$v_d = -\Psi_q \omega_r = 0$$

$$v_q = \Psi_d \omega_r = L_{md} i_{rfd}$$

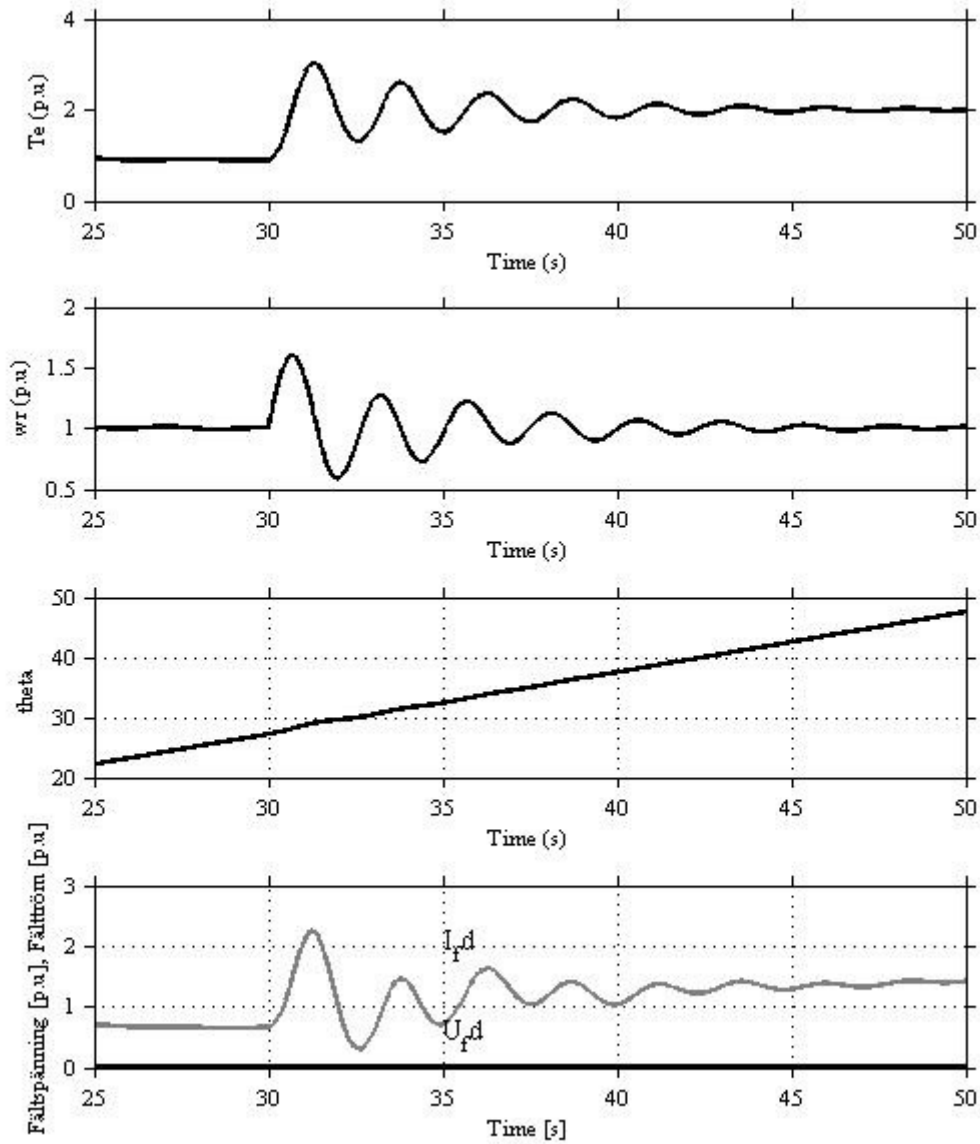
Dessutom är ω_r rotorvinkelhastigheten lika med den synkrona hastigheten, det vill säga en p.u.

Efter detta beräknas fältströmmen i_{rfd0} respektive fältspänningen E_{f0} enligt:

$$i_{rfd0} = V_q / (L_{md} \omega_r) \quad (5.1.2)$$

$$E_{f0} = i_{rfd0} R_{rfd} \quad (5.1.3)$$

Resultatet av simuleringen visas i Figur 5.1.1:

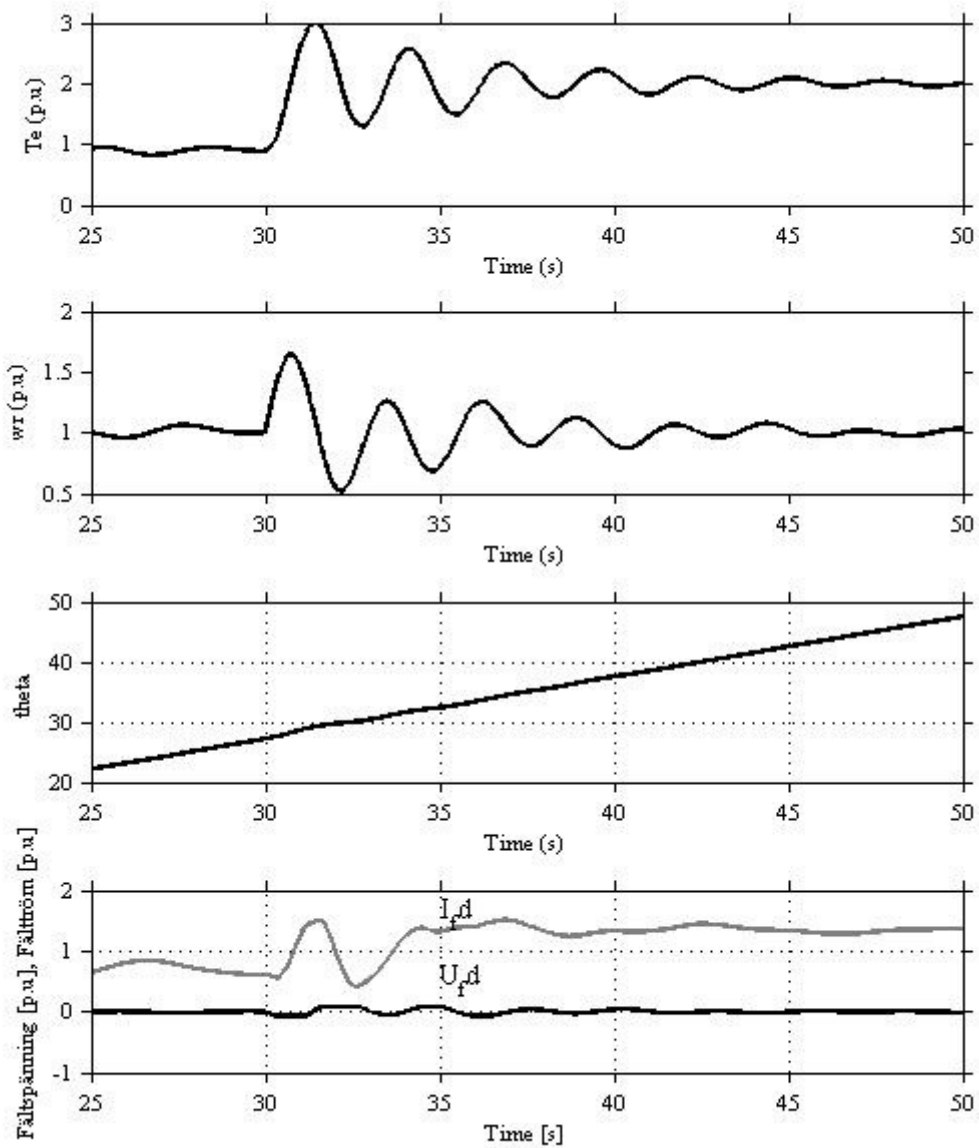


Figur5.1.1. Elektriskt vridmoments kurva, rotorvinkelfrekvensen, lastvinkel θ , Fältströmmen I_{fd} och fältspänningen U_{fd} är på grund av p.u enheterna r väldigt små och nära noll.

5.2 Magnetisering med typ DC1A (utan PSS)

I detta avsnitt, kopplas fältmatningen DC1A till synkrogeneratorn. Parametrarna till magnetiseringen används enligt bilaga E.

Resultatet av simuleringen visas i Figur 5.2.1.



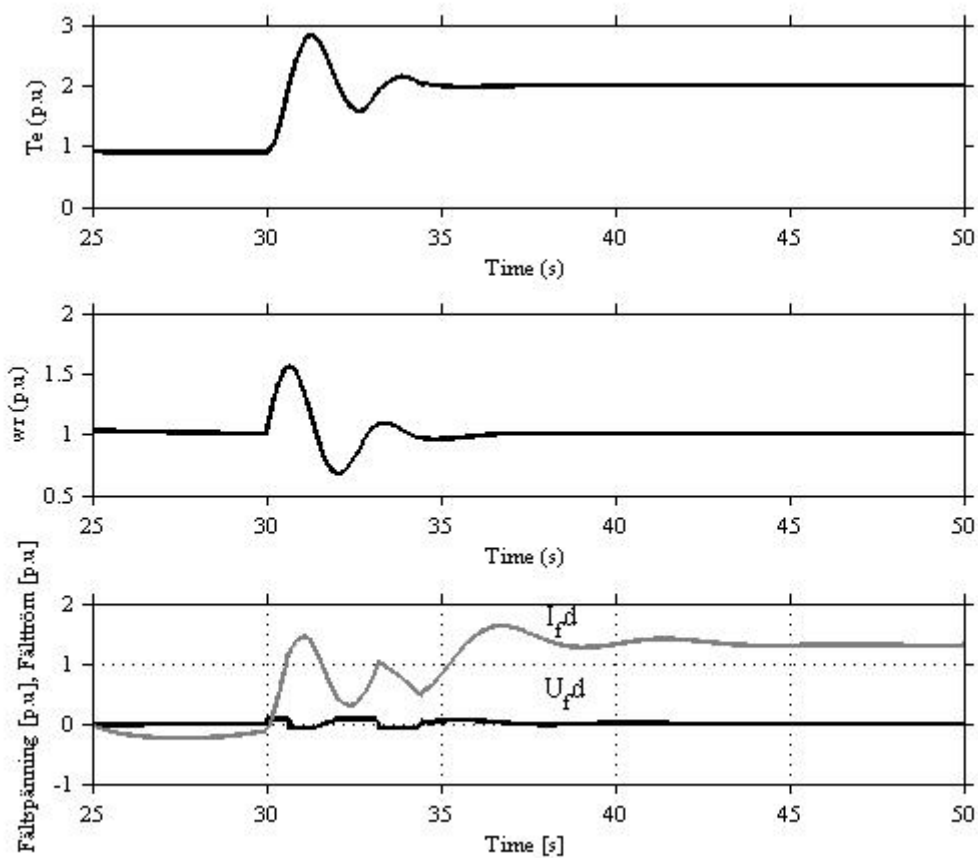
Figur 5.2.1. Elektriskt vridmoment, rotorhastighet, lastvinkel, fältströmmen och fältspänningen.

6 Effekten av PSS

Hittills hade synkrogeneratorn inget styrsystem, i det här avsnittet simuleras synkrogeneratorn med koppling av två olika modeller av PSS.

6.1 PSS typ 1

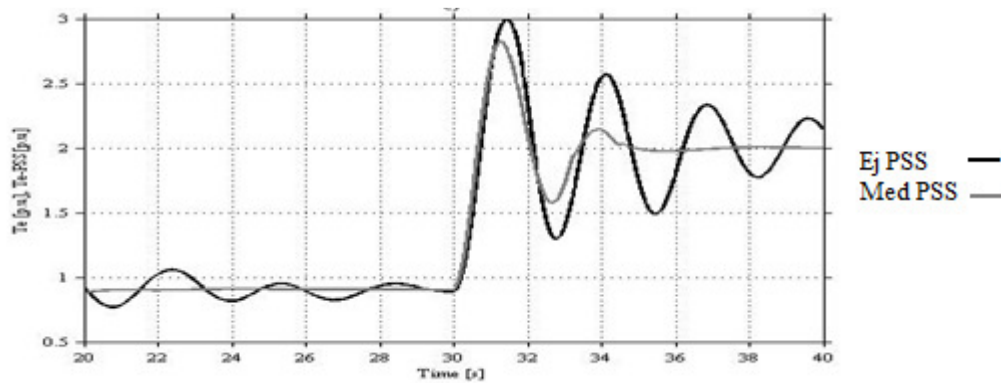
Vid en modellkonfiguration med PSS:en används indata till PSS enligt bilaga D (tabell 1.D). Maskinens märkdata väljs enligt bilaga C. Val av parametrarna utgick från den ordningen som har beskrivits i avsnitt 4.5. Resultaten av momentsteget med PSS kopplad till synkrogenerator redovisas, från steget vid tiden 0 till att stationärtillstånd upprättas, enligt Figur 6.1.1.



Figur 6.1.1 Elektriskt vridmoment, rotorvinkelfrekvens, fältströmmen och fältspänningen.

Figur 6.1.1 visar att PSS:en dämpar oscillation och den är tillfredställande för den aktuella oscillationsfrekvensen.

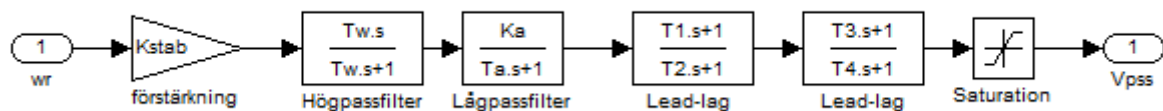
Skillnaden av det elektriskt vridmomentets svar beroende av användandet av PSS:en visas i Figuren 6.1.2



Figur 6.1.2 Jämförelse mellan elektriskmoment med och utan PSS.

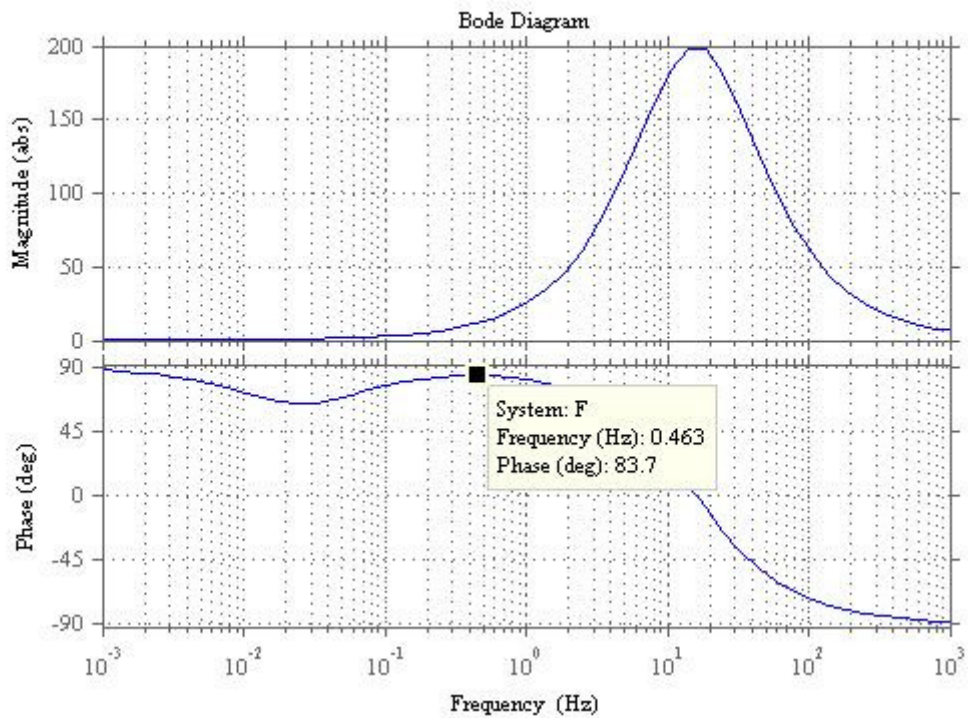
6.2 PSS typ 2

I det här avsnittet presenteras en annan modell av en PSS som i fortsättningen kallas till PSS2. Modellen består av en förstärkning, ett högpasfilter, ett lågpasfilter och två lead-lag block. De fyra blocken som användes i PSS1 har samma funktion även i PSS2, det enda blocket som skiljer sig från PSS1 är lågpasfiltret. Detta block placeras efter högpasfiltret för att signalen till PSS:en skall passera oförändrad och att det stationära tillståndet blir oförändrad. Modellen illustreras i Figur 6.2.1.



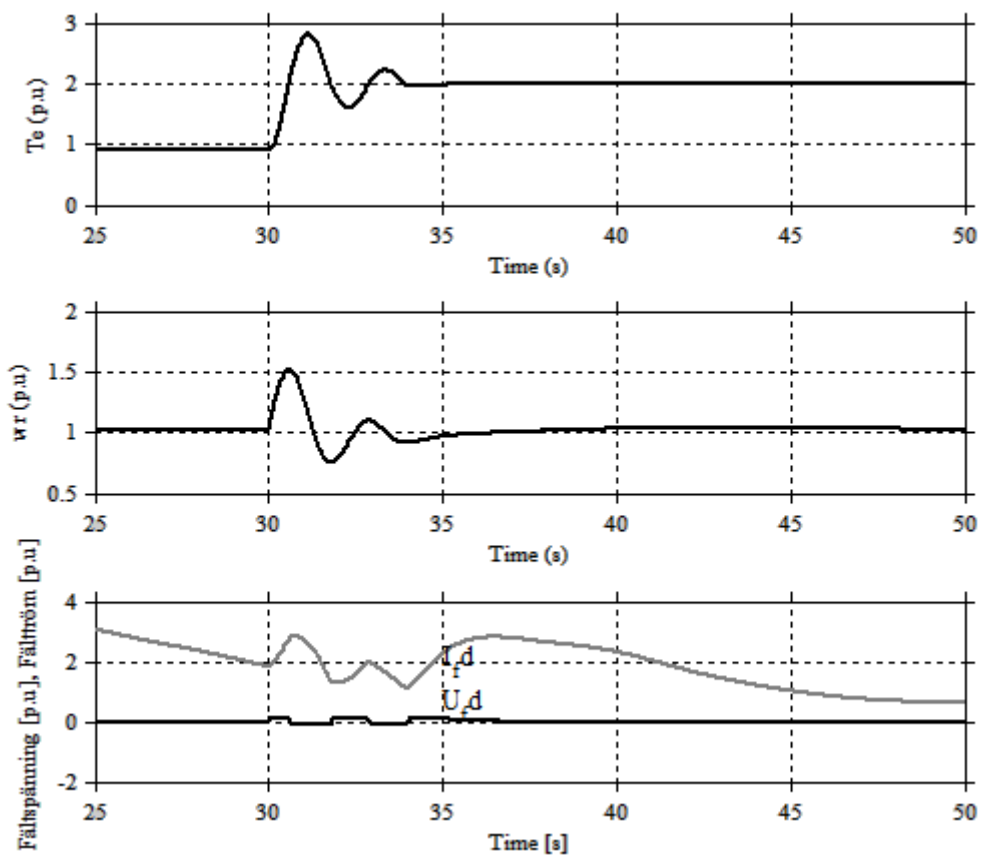
Figur 6.2.1. PSS modellen typ 2.

Fasskillnaden som PSS:en ska motverka är även här 90° . Parametrarna till den här modellen sätts efter metoden som förklarades i avsnitt 4.4, se bilaga D (tabell 2.D). Bodediagrammet i Figur 6.2.2 visar på en fasvridning på $83,7^\circ$ vid frekvensen 0,46 Hz.

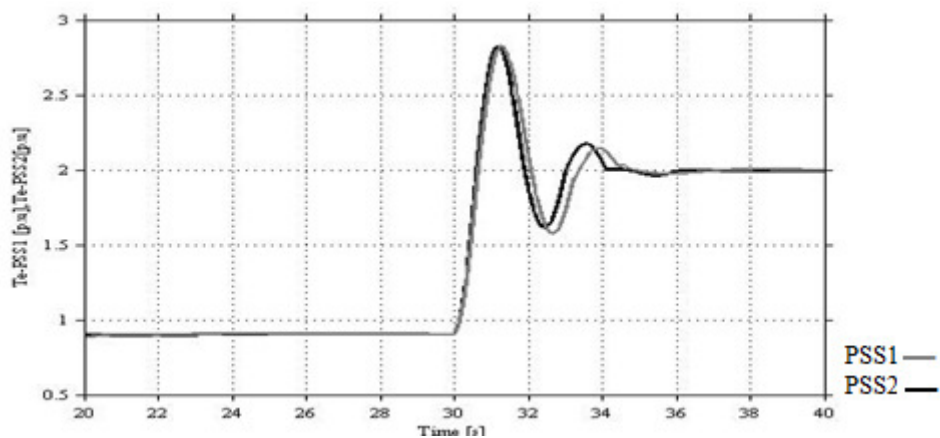


Figur 6.2.2. Bodediagram för PSS2.

Resultatet av PSS modellen som inkluderar lågpassfiltret illustreras i Figur 6.2.3.



Figur 6.2.3. Elektriskt moment, rotorvinkelfrekvens, fältström och spänning.



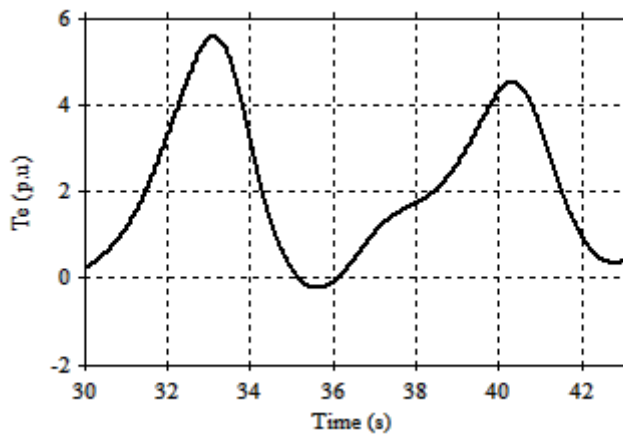
Figur 6.2.4. Jämförelse av elektriskmoment beroende av typ PSS1 och typ PSS2.

Figur 6.2.4 visar att två PSS:er kan dämpa oscillationen önskvärt. Skillnaden som kan ses mellan de två modellerna är att PSS2 dämpar oscillationerna snabbare men med mer översväng jämfört med PSS1.

7 Oscillationsfrekvensändring

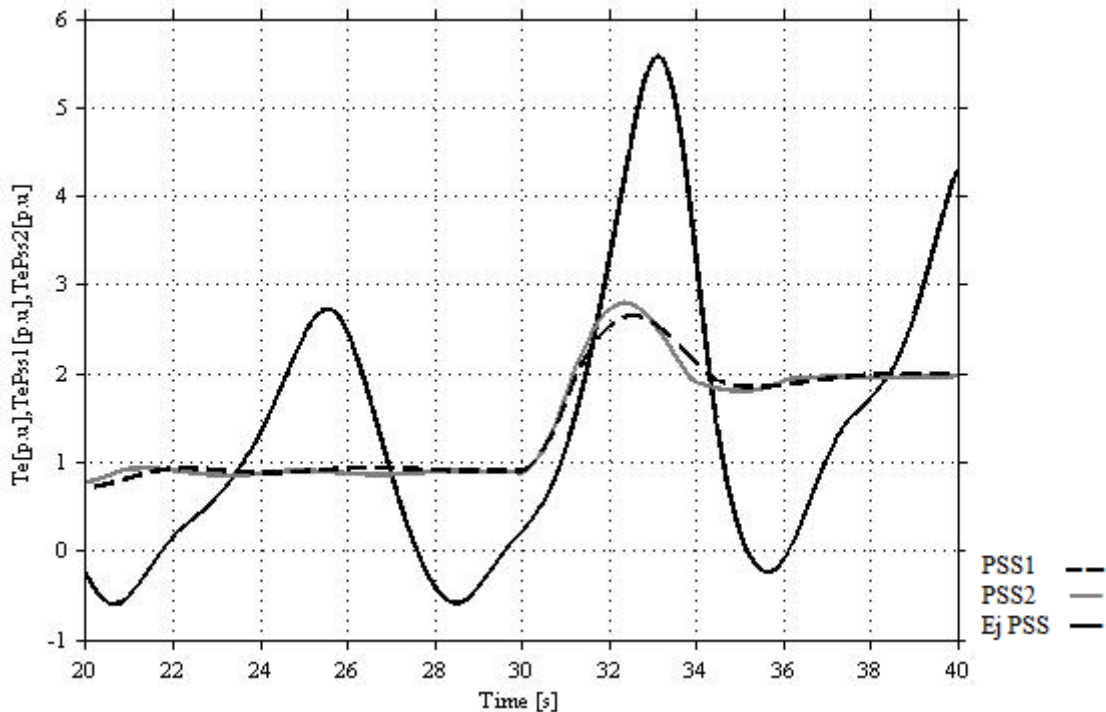
För att undersöka om PSS:er fungerar för andra typer av oscillationer ändrades oscillationsfrekvensen.

I figuren 7.1 visas svängningarna i elektriska vridmomentet och för en annan oscillationsfrekvens. Enligt figuren är oscillationsfrekvensen $0,83 \text{ rad/s}$ ($0,13 \text{ Hz}$).



Figur 7. 1 Elektriskt moment med oscillationsfrekvensen $0,13 \text{ Hz}$.

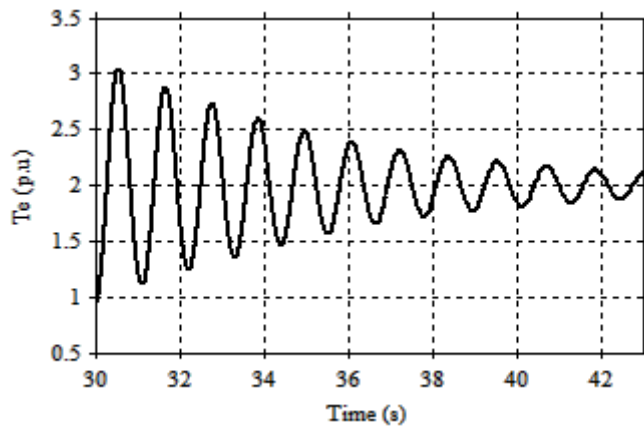
Resultatet av simulering visas i Figur 7.2.



Figur 7. 2. De olika svaren i elektriskt moment beroende på typ av PSS.

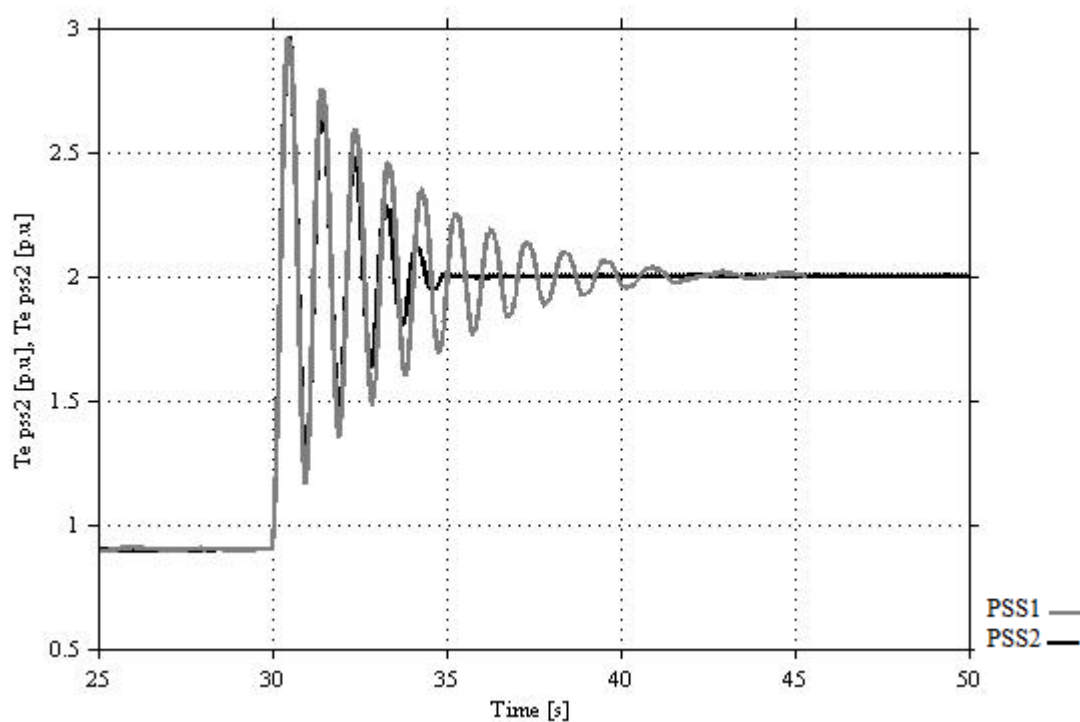
Figuren visar att båda typer av PSS kan dämpa pendlingar men PSS2 är snabbare jämfört med PSS1.

Då ökades oscillationsfrekvensen. I Figur 7.3 visas oscillationsfrekvensen i elektriskt vridmoment. Enligt figuren är oscillationsfrekvensen $5,65 \text{ rad/s}$ ($0,9 \text{ Hz}$).



Figur 7.3 Oscillationfrekvensen i elektriskt vridmoment.

Resultatet av simulering visas i Figur 7.4.



Figur 7.4 Olika svar i elektriskt moment beroende på typ av PSS.

Diskussion

Ur resultatet av simuleringen i fallet med magnetiseringssystemet DC1A skiljer svängningarna i elektriskt vridmoment och rotorvinkelfrekvensen inte sig från resultatet av konstant magnetisering enligt Figurer 5.2.1 och 5.2.2, detta kan vara på grund av att magnetiserings- systemet är självmagnetiseringssystem.

PSS1 dämpar oscillationer och den är tillfredställande vid frekvensen $2,89 \text{ rad/s}$, fasgrafen till PSS1 bekräftar att PSS1 har en dålig fas form, särskilt runt $0,1\text{-}0,3 \text{ Hz}$, vilket gör att den inte kan klara av att hantera snabbare lokal eller inter-area oscillationer i kraftsystemet. Dessutom är den passande till den här frekvensen av oscillationen och med ökande oscillation kan den inte motverka instabiliteten, utan tvärtom, amplituden ökar.

Bodediagrammet till PSS2 visar en fasvridning på $83,7^\circ$ vid frekvensen $0,46 \text{ Hz}$. Dessutom ligger fasvridningen mellan 80° till 90° vid frekvenser mellan $0,1\text{Hz}$ till 2Hz . Den viktigaste förbättringen av denna modell är DC-förstärkningen som minskar med ökande frekvens.

Vidare för att undersöka om PSS:er fungerar för andra typer av oscillationsfrekvenser ökades och minskades oscillationsfrekvensen genom ändring av maskinens tröghetskonstant H . Med ökande tröghetskonstant minskades oscillationsfrekvensen och med minskade tröghetskonstant ökades oscillationsfrekvensen. I mindre oscillationsfrekvenser dämpar PSS2 oscillationerna snabbare men med mer översväng jämfört med PSS1.

Resultatet av ökande oscillationsfrekvensen visade att PSS1 inte kunde dämpa tillräckligt även om man ser förbättringar av svängningar. Däremot dämpar andra modellen PSS2 oscillationen snabbare med mindre översväng.

Slutsats

Parametrarna till synkrogeneratoren valdes från ett exempel [3.2 ,sida 102] i referensen 1. Skillnaden är att den modellen hade två dämpblindningar för rotorn men här hade rotorn bara en dämpblindning.

Det finns inga givna parametrar för magnetiseringssystemet till den aktuella synkronmaskin, sålunda valdes dessa genom in justering. Detta betyder att resultaten är en konsekvens av detta.

Resultatet av koppling av PSS till hela systemet visade att den lyckades dämpa svängningar. Modellen PSS1 hade bra reglering för vissa frekvenser även den hade lagom förstärkning, däremot ökade den med ökning av frekvensen.

Modellen PSS2 hade en reglering som hanterar både lokala och inter-area oscillationer men förstärkningen var ganska hög. En modell av en PSS med både rotorhastighet och aktiv effekt som insignaler vore en bra idé att implementera i vidare studier.

PSS modellen skulle kunna testas på en synkrogenerator men förståelse till problemet och implementering av synkrogeneratoren och magnetiseringssystemet i Simulink tog mycket tid så detta kan inte utföras i detta arbete.

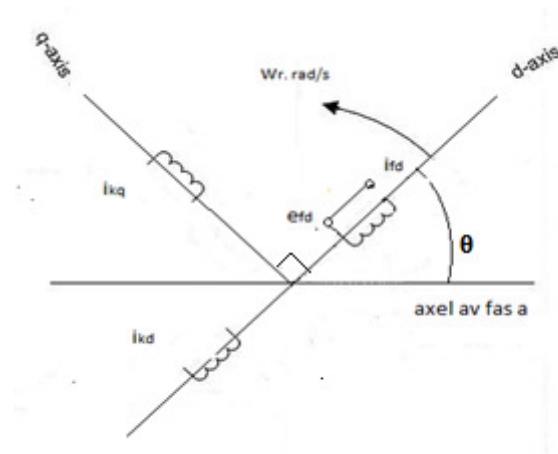
Referenser

- 1) Kundur, P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
- 2) IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE St. 421.5-2002.
- 3) El-Sadek M. Z., "Power System Control", Muchtar press- Assiut- Egypt, 2004.
- 4) Mihailovic, Zoran , "MODELING AND CONTROL DESIGN OF VSI-FED PMSM DRIVE SYSTEMS WITH ACTIVE LOAD", University Libraries at Virginia Tech, 1998.
- 5) Hallenius, Karl-Erik, "Elektriskamaskiner", Lund Gleerup, 1972.

Bilagor

Bilaga A. dq -transformation

Direktaxel (*d-axis*) komponenten i *d*-led är centrerade i magnetiskt centrum av nordpolen och orthogonalaxeln (*q-axis*) ligger 90 elektriska grader före *d*-axeln. Figuren 1.A visar *dq*-koordinatsystem i förhållande till fas a-axel och rotorposition.



Figur 1.A Direkt and kvadratur axlar

Position av rotorn i förhållande till statorn beror på vinkel θ mellan *d*-axel och magnetisk axel av fas a som ökar denna vinkel med rotorrotation enligt:¹

$$\theta = \omega_r * t$$

Dq-transformation kallas även Parktransformation och är en koordinattransformation från det trefasiga stationära koordinatsystemet till ett roterande koordinatsystem. En förutsättning är att statorlindningen är symmetriskt trefasig. Denna transform sker i två steg:

- 1) en transform från trefasiga stationära koordinatsystem till två fas, så kallade $\alpha\beta$, ett stationärt koordinatsystem och
- 2) en transformation från $\alpha\beta$ stationära koordinater till ett roterande koordinatsystem *dq*.

I ekvation A.1 visas transformationen från stationär trefas till stationär tvåfas och ekvation A.2 visar transformationen från stationär tvåfas till roterande tvåfas.⁴

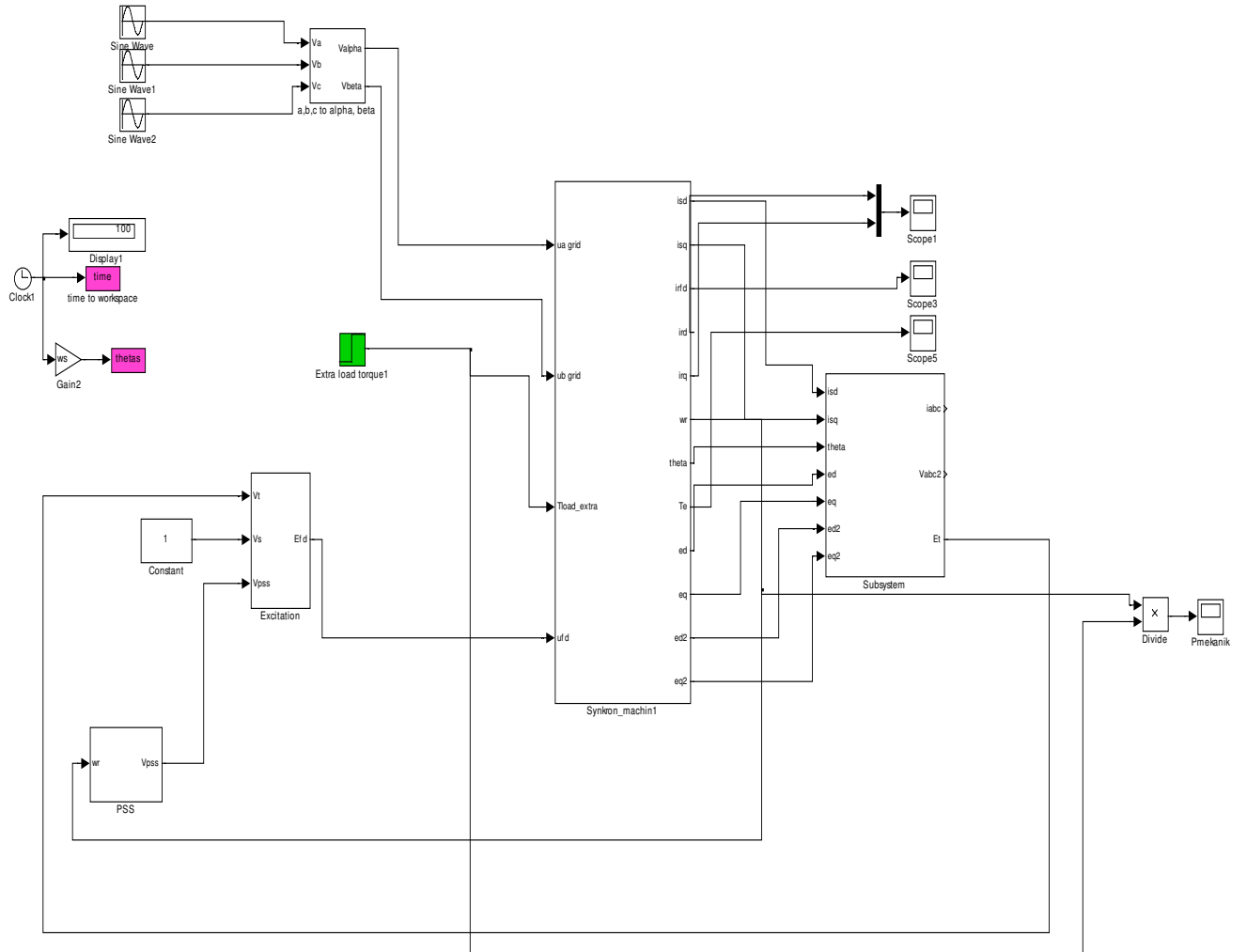
$$\begin{bmatrix} u\alpha \\ u\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u\alpha \\ u\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Parktransformation kan även skrivas som ekvationen A.3 där en direkt transformation från stationär trefas (a,b,c) till den d-q tvåfas visas.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Bilaga B. Modell över synkrongeneratorn kopplad till ett starkt nät i Simulink



Bilaga C. Synkrongeneratorm parametrar

Tabell C. Parametrar till synkrongeneratorm

Parametrar	beteckningar	värde	enhet
Stator resistans	R_s	0,081	P.u
Rotor dämpningsresistans i d-led	R_{rd}	0,0009	P.u
Rotor dämpningsresistans i q-led	R_{rq}	0,0068	P.u
Rotor fältlindningsresistans	R_{rfd}	0,028	P.u
Rotor dämpningsinduktans i d-led	L_{md}	1,66	P.u
Rotor dämpningsinduktans i q-led	L_{mq}	1,61	P.u
Rotor dämpningsresistans i q-led	L_{rd}	1,82	P.u
Rotor dämpningsresistans i q-led	L_{rq}	1,76	P.u
Stator läckinduktans	L_{sl}	0,15	P.u
Fält läckinduktans	L_{lfd}	0,15	P.u
Rotor fältlindningsinduktans	L_{rfd}	1,66	P.u
Tröghetskonstantkonstant	H	1	P.u

Bilaga D. Parametrar till PSS:er överföringsfunktioner

Tabell 2.D. Parametrar till PSS1 överföringsfunktioner

Parametrar	värde	värde	enhet
T_w	4		sekund
T_1	0,81		sekund
T_2	0,14		sekund
T_3	0,81		sekund
T_4	0,14		sekund
Kstab	2		p.u

Tabell 2.D. Parametrar till PSS2 överföringsfunktioner

Parametrar	värde	värde	enhet
T_w	10		sekund
T_1	2		sekund
T_2	0,01		sekund
T_3	1		sekund
T_4	0,01		sekund
Kstab	2		p.u
T_a	2		sekund
Ka	1		p.u

Bilaga E. Parametrar till magnetiseringssystem

Tabell E. Parametrar till magnetiseringssystem

Parametrar	värde	enhet
T_R	0	sekund
T_B	0	sekund
T_C	0	sekund
T_A	0,01	sekund
K_A	200	p.u
T_F	1	sekund
K_F	0,01	p.u
T_E	0,01	sekund
K_E	100	p.u
