

Modell av en synkronmaskin för
PSCAD/EMTDC med
magnetisk mättning i d -led och
elektriskt gränssnitt för fältmatare:

av

Magnus Jonsson



CHALMERS

*Rapport för examensarbetet inom Elmaskinteknik,
civilingenjörsprogrammet för Elektroteknik 180p,
mars 2003*

Institutionen för Elteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg

Light Competence Center
Power Systems HVDC
ABB Power Technologies
Göteborg

Abstract

This report describes a synchronous machine model with magnetic saturation in d-axis, neutral connection and electrical exciter interface for the transient simulator PSCAD/EMTDC. It has been designed and verified in comparison to the regular machine model in EMTDC.

The performance of the model is very good when incorporating a linear as well as a saturated magnetising inductance. The dynamic deviation is only thousandths to ten thousandths per unit. By using a cubic interpolation of the saturation curve, the model gives a good representation of the saturation effect. The open source code implementation of the synchronous machine model gives the possibility to easily adapt the model to specific requirements.

The derived model makes it possible to simulate a synchronous machine with its excitation systems, e.g. a brushless exciter with ac/ac thyristor connection and rotating rectifier. Also, effects of fault and grounding of stator winding starpoint can be simulated.

Sammanfattning

I denna rapport redovisas en synkronmaskinmodell för simuleringsprogrammet EMTDC, från teori och implementering i Fortran till verifiering i EMTDC. Bland modellens egenskaper kan nämnas mättning av magnetiseringsinduktansen, ett elektriskt gränssnitt mot fältlindningen samt extern neutralanslutning. Modellen har namnet NEFI, Neutral and Electric Field winding Interface.

NEFI-modellen har stora likheter med den befintliga modellen i EMTDC men skiljer sig åt på vissa punkter. NEFI-modellen har en kraftfullare interpoleringsmetod för den magnetiska mättningskurvan. Endast NEFI-modellen har elektrisk fältlindningsmatning och extern neutralkrets. Dock bör påpekas att "termineringen" av anslutningsklämmorna endast till vissa delar är implementerad och verifierad. Termineringen ger ett bättre och stabilare beteende vid transienter i nätet samt vid anslutning till nät med hög impedans, men orsakar den felström som påvisas i simuleringarna. NEFI-modellens terminering är endast testad översiktligt och är i normalläge, liksom vid jämförande simuleringar, fränkopplad.

Synkronmaskinmodellen har verifierats för olika konfigurationer mot en befintlig modell i EMTDC. Resultatet visar på en mycket god överensstämmelse i stationärtillstånd eller god överensstämmelse vid laststeg, undantaget en storhet, den befintliga modellens fasströmmar. Dock pratar vi i detta fallet endast om avvikelser på 0.01 – 0.02 *p.u.* Dessa består genom alla verifieringarna och orsakas av terminering av fasklämmorna, något som saknas på NEFI-modellen. I stegsvaret ses momentant något större avvikelser, i synnerhet för den ickelinjära modellen. Detta kan bero dels på termineringen, dels på olika interpoleringsmetoder.

Den befintliga modellen använder linjär interpolering för magnetisk mättning medan Hermite-interpolering är den metod som valts till NEFI-modellen. Metoden är kubisk och i modellen medges interpolering av upp till femton noder.

Maskinmodellen, som bygger på en tillståndsmodell i $dq0$ -systemet enligt Park, kan simulera dels linjära induktanser, dels en strömberoende magnetiseringsinduktans i d -led. Modellen omfattar upp till tre ekvivalenta lindningar i vardera d - och q -led.

Statorlindningarnas alla terminaler kan kopplas externt vilket medger studier av impedansjordning, skyddskretsar etc. Maskinmodellen är vidare konstruerad så att den enkelt kan kopplas ihop med avancerade massmodeller, som finns tillgängliga i PSCAD/EMTDCs bibliotek.

Modellen är skriven i Fortran och kopplad till en komponent i PSCAD, det grafiska användargränssnittet i EMTDC. Mättning är implementerad som en subrutin och den strömberoende induktansen är implementerad som funktion. Interpoleringen av tomgångskurvan kan därför enkelt kompletteras med alternativa metoder.

Förord

Denna rapport beskriver framtagandet av en synkronmaskinmodell. Rapporten är resultatet av ett examensarbete och redovisar stegen från teori till implementering och verifiering. Examensarbetet har utförts vid och finansierats av ABB Power Systems HVDC.

Jag vill tacka mina handledare Anders Lasson, ABB Light Competence Center, och Torbjörn Thiringer, Elteknikinstitutionen Chalmers, för deras inspirerande, pedagogiska och tålmodiga hjälp och vägledning. Jag har haft förmånen att få fördjupa mig inom spännande och intressanta områden, med både bredd och djup. Jag vill även tacka övriga medarbetare på avdelningen LLC för såväl teoretisk som praktisk hjälp med mitt examensarbete. Det har varit en trevlig och stimulerande arbetsplats präglad av ett stort kunnande.

Min fästmö vill jag tacka särskilt, för all språklig hjälp och för hennes förståelse under de många kvällar och helger som jag har ägnat mig åt rapportskrivning.

Göteborg i mars 2003

Magnus Jonsson

Innehåll

Figurförteckning	xii
Tabellförteckning	xiii
Symbolförteckning	xv
1 Inledning	1
1.1 Problembakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Tillvägagångssätt	1
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Rapportdisposition	2
2 Maskinmodell utan mätning	3
2.1 Modelldefinitioner	4
2.1.1 Referenser och vektorrepresentation	4
2.1.2 Spänningsekvationer	5
2.1.3 Flödesekvationer	7
2.1.4 Momentekvationer	8
2.1.5 Ekvationer i stationärtillstånd	9
2.1.6 Tillståndsmodell	10
2.2 Ekvivalenta scheman	15
2.3 Sammanfattning	15
3 Maskinmodell med magnetisk mätning	17
3.1 Modelldefinitioner	17
3.1.1 Strömberoende induktans vid mätning	17
3.1.2 Tomgångskurvan	18
3.1.3 Interpolering	20
3.2 Ekvationer	20
3.2.1 Interpoleringskoefficienter	20
3.2.2 Mättad induktans	22
3.2.3 Tillståndsmodell	22
3.3 Sammanfattning	24
4 Implementeringar	25
4.1 Linjär Simulink-modell	25

4.1.1	S-funktion	25
4.2	Modellen i EMTDC (NEFI-modellen)	28
4.2.1	Elektriska gränssnitt	28
4.2.2	Komponenten	30
4.2.3	Linjär modell	32
4.2.4	Ickelinjär modell	37
4.3	Jämförelse mot befintlig modell (Manitoba-modellen)	41
4.4	Sammanfattning	41
5	Simuleringar	43
5.1	Verifieringsmetoder	43
5.1.1	Stationäranalys	44
5.1.2	Momentsteg	44
5.2	Linjär modell med enkla dämplindningar	45
5.2.1	Uppkoppling	45
5.2.2	Maskin- och systemparametrar	46
5.2.3	Stationära tillstånd	46
5.2.4	Momentsteg	47
5.3	Linjär modell med dubbla dämplindningar i q -led	55
5.3.1	Uppkoppling	55
5.3.2	Maskin- och systemparametrar	55
5.3.3	Momentsteg	55
5.4	Linjär modell i obalanserat nät	60
5.4.1	Uppkoppling	60
5.4.2	Maskin- och systemparametrar	60
5.4.3	Momentsteg	61
5.5	Linjär modell med dubbla massor	65
5.5.1	Uppkoppling	65
5.5.2	Maskin- och systemparametrar	65
5.5.3	Momentsteg	65
5.6	Mättad modell med enkla dämplindningar	70
5.6.1	Uppkoppling	70
5.6.2	Maskin- och systemparametrar	70
5.6.3	Stationära tillstånd	70
5.6.4	Momentsteg	72
5.7	Sammanfattning	77
6	Slutsats	79
6.1	Förslag till fortsatt arbete	80
6.1.1	Mer sofistikerad integration	80
6.1.2	Kopplat flöde och korskopplingstermer.	80
6.1.3	Mättning av luftgapsflödet i q -led.	80
6.1.4	Mättning av modellens statorläckflöde.	80
6.1.5	Kabelmodell i statorn	81
6.1.6	Terminering	81
	Litteraturförteckning	83

A	Koordinattransformation	85
B	Interpolering och kurvanpassning	87
	B.1 Kubisk Hermite-interpolation	88
	B.2 Linjär interpolation	89
	B.3 Kubisk Spline-interpolation	89
	B.4 Polynomanpassning	90
C	Storheter i per unit	92
D	Maskin- och systemparametrar	94
E	Terminering av Manitoba-modellen	96
F	Help file for the NEFI-model	98
G	The STOR-vector in the NEFI-model	103
H	The STORF-vector in the NEFI-model	107

Figurer

2.1	Högspänningssynkronmotor	3
2.2	Spännings-, ström- och flödesvektorer i $dq0$ -systemet	5
2.3	De fiktiva lindningarna i dq -systemet	6
2.4	Ekvivalenta schemat i d -led.	15
2.5	Ekvivalenta schemat för enkel dämplindning i q -led.	15
2.6	Ekvivalenta schemat för nollföljds-kretsen.	15
2.7	Ekvivalenta schemat för dubbla dämplindningar i q -led.	16
3.1	En enkel LR-krets.	17
3.2	Tomgångskurvan för en synkronmaskin	19
3.3	Kubisk Hermite-interpolation av en strömberoende induktans och dess derivata.	20
4.1	Signaluppkopplingen för S -funktionen i Simulink.	26
4.2	Programstrukturen för S -funktionen i Simulink.	27
4.3	Olika anslutningssätt av modellens statorlindningar.	29
4.4	Komponentens struktur i <i>Component Workshop</i>	31
4.5	Synkronmaskinkomponenten i PSCAD, konfigurerad som <i>Isolated</i>	32
4.6	Maskinmodellkomponenten med alternativa anslutningar.	32
4.7	Komponenten med ingången ω , för externt styrd rotorhastighet, <i>External</i>	33
4.8	Programstrukturen för programdelen <i>DSDYN</i>	34
4.9	Programstrukturen för subrutinen U_SM0	36
4.10	Formulärsidan för inmatning av tomgångskurvan	37
4.11	Den grafiska komponenten i EMTDC med symbol för mättning.	38
4.12	Programstrukturen för den mättade modellens subrutin U_SM0	39
4.13	Programstruktur för beräkning av Hermitekoefficienterna	40
4.14	Programstruktur för beräkning av den strömberoende induktansen	40
5.1	Uppkopplingen i EMTDC	46
5.2	De linjära modellernas momentstegsvar	49
5.3	Skillnaden mellan de linjära modellernas momentstegsvar	50
5.4	De linjära modellernas strömmarna vid ett momentsteg	51
5.5	Skillnaden mellan de linjära modellerna strömmarna vid ett momentsteg	52
5.6	Skillnaden mellan intern respektive extern fältspänningsmatning	53
5.7	Skillnaden i strömmarna vid ett momentsteg med intern respektive extern fältspänningsmatning	54
5.8	Momentstegsvaret för de linjära modellerna, med dubbla dämplindningar i q -led	56

5.9	Skillnaden mellan de linjära modellernas momentstegsvar, med dubbla dämp- lindningar i q -led	57
5.10	Dämpströmmarna för de linjära modellerna med dubbla dämpindningar i q -led	58
5.11	Skillnaden mellan de linjära modellerna med dubbla dämpindningar i q -led . .	59
5.12	Uppkopplingen i EMTDC med impedansjordning	60
5.13	Uppkopplingen i EMTDC med impedansjordning	61
5.14	De linjära modellernas neutralström och neutralspänning vid obalans	62
5.15	Skillnaden mellan de linjära modellernas neutralström och neutralspänning vid obalans	63
5.16	Skillnaden mellan de olika anslutningsalternativ av impedansjordning vid obalans	64
5.17	Uppkopplingen i EMTDC med en <i>Multimass</i> -komponent	65
5.18	De linjära modellernas momentstegsvar, med ett system av dynamiska massor .	66
5.19	Skillnaden mellan de linjära modellernas momentstegsvar, med ett system av dynamiska massor	67
5.20	Strömsvaret med ett system av dynamiska massor	68
5.21	Skillnaden mellan strömmarna vid ett momentstegsvar med ett system av dy- namiska massor	69
5.22	De icke linjära modellernas momentsvar	73
5.23	Skillnaden mellan de icke linjära modellernas momentsvar	74
5.24	De icke linjära modellernas strömmar vid ett momentsteg	75
5.25	Skillnaden mellan de icke linjära modellernas strömmar vid ett momentsteg . . .	76
A.1	Parks koordinattransformation och dess invers.	85
B.1	Kubisk Hermite-interpolation av tomgångskurvan för en synkronmaskin.	88
B.2	Linjärinterpolation av tomgångskurvan för en synkronmaskin.	89
B.3	Spline-interpolation av tomgångskurvan för en synkronmaskin.	90
B.4	Kurvanpassning av tomgångskurvan för en synkronmaskin.	91
D.1	Tomgångskurvan för Alakülas synkronmaskin	95
E.1	Termineringen vid en anslutningsklämma för Manitoba-modellen.	97

Tabeller

2.1	Index i det stationära koordinatsystemet	8
2.2	Index i det roterande koordinatsystemet	8
5.1	Definitionerna på fältspänningen för den linjära modellen	44
5.2	Momentsteget vid tidpunkten t_0	45
5.3	Mätresultat vid stationärtillstånd och tomgång för $u_{f0} = 1.0$	47
5.4	Mätresultat vid stationärtillstånd och T_N för $\cos \varphi = 1.0$	47
5.5	Tilläggsparametrar för dubbla dämpindningar i q -led	55
5.6	Impedanser för obalans och impedansjordning.	61
5.7	Definitioner av fältspänningen för den mättade modellen	71
5.8	Mätresultat för den mättade modellen i tomgång.	71
5.9	Mätresultat för den mättade modellen vid märkmoment.	72
5.10	Den icke linjära modellens kvarvarande avvikelserna i stationärtillstånd.	77
D.1	Märkdata för en 4-polig synkronmaskin.	94
D.2	Maskinparametrarna som används i simuleringarna.	94

Symbolförteckning

Beteckning	Benämning	Enhet
abc	Stationära trefassystemet	
$\alpha, \alpha_k, \alpha_{kk}$	Hermite-interpoleringskoefficienter	
$\alpha\beta$	Stationära tvåfassystemet	
d	d -axeln i $dq0$ -planet, <i>direct axis</i>	
$dq0$	Roterande tvåfassystemet med nollföljdskomponenten	
δ	Lastvinkel	rad
δ_s	Statorflödesvinkel i $dq0$ -planet	rad
f_N	Nominell frekvens	Hz
f_s	Systemfrekvens	Hz
ϕ	Vinkeln mellan \vec{u}_s och \vec{i}_s . Effektfaktorn ges av $\cos\phi$	
ϕ_s	Vinkeln mellan d -axeln och $\vec{\psi}_s$.	
G	Induktansmatris för faktorisering med tillstånden ω	
i	Tillståndsvektorn	
i_0	Nollföljdsströmmen (tillstånd)	A
i_a, i_b, i_c	Momentan värdena av fasströmmarna (3-fas)	kA/A
i_α, i_β	Momentan värdena av fasströmmarna (2-fas)	A
i_d	Statorströmmen i d -led (tillstånd)	A
i_{d0}	Statorströmmen i d -led vid tomgång (= 0)	A
i_D	Dämpströmmen i d -led (tillstånd)	A
i_{D0}	Dämpströmmen i d -led vid tomgång (= 0)	A
i_f	Fältströmmen överreducerad till statorsidan (tillstånd)	A
i_f^{nom}	Nominell fältström, se även i_{f0}	A
i_{f0}	Fältströmmen vid tomgång	A
i_{f+}, i_{f-}	Strömmen i fältlindningsklämmorna	kA
I_{fas}	RMS-värdet för fasströmmen	A
i_{md}	Strömmen i magnetiseringslindningen i d -led	A
i_n	Neutralströmmen	kA/A
I_N	RMS-värdet för nominell ström	kA
i_q	Statorströmmen i q -led (tillstånd)	A
i_{q0}	Statorströmmen i q -led vid tomgång (= 0)	A

Beteckning	Benämning	Enhet
i_Q	Dämpströmmen i q -led (1x dämplindning) (tillstånd)	A
i_{Q0}	Dämpströmmen i q -led vid tomgång (= 0)	A
i_{Q_1}, i_{Q_2}	Dämpströmmarna i q -led (2x dämplindningar) (tillstånd)	A
i_s	Statorströmmen i $dq0$ -planet	A
I, I_k	Strömnoderna ur tomgångskurvan	
J	Tröghetsmomentet	kgm^2
H	Tröghetsmomentet (normerat)	$\frac{MW_s}{MVA}$
$H(i), H(x)$	Det kubiska Hermite-polynomet	
L	Induktansmatrisen	
$L(i)$	Strömberoende induktansen i d -led L_{STAT}	$p.u.$
L_d	Statorlindningsinduktansen i d -led (alt. 1)	$p.u.$
L_D	Dämplindningsinduktansen i d -led	$p.u.$
$L_{D\sigma}$	Läckinduktansen i dämplindningen	$p.u.$
L_{DYN}	Dynamiska induktansen, $\frac{dL(i)}{dt}$	
L_{dfD}	Delmatris över induktanserna i d -led	
L_f	Fältlindningsinduktansen i d -led	$p.u.$
$L_{f\sigma}$	Läckinduktansen i fältlindningen	$p.u.$
L_{md}	Magnetiseringsinduktansen i d -led	$p.u.$
L_{mq}	Magnetiseringsinduktansen i q -led	$p.u.$
L_q	Statorlindningsinduktansen i q -led (alt. 1)	$p.u.$
L_Q	Dämplindningsinduktansen i q -led (1x dämplindning)	$p.u.$
$L_{Q\sigma}$	Läckinduktansen i dämplindningen	$p.u.$
L_{Q_1}	1:a dämplindningsinduktansen i q -led (2x dämplindning)	$p.u.$
$L_{Q_1\sigma}$	Läckinduktansen i 1:a dämplindningen i q -led	$p.u.$
L_{Q_2}	2:a dämplindningsinduktansen i q -led (2x dämplindning)	$p.u.$
L_{Qq}	Delmatris över induktanserna i q -led (1x dämplindning)	
L_{QQq}	Delmatris över induktanserna i q -led (2x dämplindning)	
$L_{Q_2\sigma}$	Läckinduktansen i 2:a dämplindningen i q -led	$p.u.$
L_{sd}	Statorlindningsinduktansen i d -led (alt. 2)	$p.u.$
L_{sq}	Statorlindningsinduktansen i q -led (alt. 2)	$p.u.$
$L_{s\sigma}$	Läckinduktansen i statorn	$p.u.$
L_{STAT}	Statiska induktansen, $L(i)$	
n	Lindningsomsättningen mellan fältlindningen och en statorlindning (tvåfas)	
$n_{\alpha\beta}$	Lindningsvarv för en statorlindning i $\alpha\beta$ -systemet	
n_d, n_q	Lindningsvarv för respektive tvåfaslindningen i dq -planet	
n_f	Lindningsvarv för fältlindningen	
p	Antalet polpar	
P_{el}	Aktiv effekt	W
P_m	Mekanisk effekt	W
P_N	Nominell aktiv effekt	kW/MW

Beteckning	Benämning	Enhet
ψ_d	Statorflödet i d -led	Wb
ψ_{d0}	Statorflödet i d -led vid tomgång	Wb
ψ_D	Dämplindningsflödet i d -led	Wb
ψ_f	Fältlindningsflödet överreducerad till statorsidan	Wb
ψ_q	Statorflödet i q -led	Wb
ψ_Q	Dämplindningsflödet i q -led (1x dämplindning)	Wb
ψ_{Q_1}, ψ_{Q_2}	Dämplindningsflödena i q -led (2x dämplindningar)	Wb
ψ_s	Statorflödet i $dq0$ -planet	Wb
q	q -axeln i $dq0$ -planet, <i>quadrature axis</i>	
Q_{el}	Reaktiv effekt	VAr
R	Resistansmatrisen	
R_D	Dämplindningsresistansen i d -led	$p.u.$
R_f	Fältlindningsresistansen i d -led	$p.u.$
R_Q	Dämplindningsresistansen i q -led (1x dämplindning)	$p.u.$
R_{Q_1}	1:a dämplindningsresistansen i q -led (2x dämplindningar)	$p.u.$
R_{Q_2}	2:a dämplindningsresistansen i q -led (2x dämplindningar)	$p.u.$
R_s	Statorlindningsresistansen	$p.u.$
S_d	Deriverad mättad statorinduktans i d -led	$p.u.$
S_D	Deriverad mättad dämplindningsinduktans i d -led	$p.u.$
S_f	Deriverad mättad fältlindningsinduktans	$p.u.$
S_{md}	Deriverad mättad magnetiseringsinduktans i d -led	$p.u.$
S_N	Nominell skenbar effekt	kVA/MVA
T, T_m	Mekaniska momentet, in-/utsignal	$p.u./Nm$
T_{el}	Elektriska momentet	$p.u./Nm$
T_N	Nominellt moment	Nm
θ	Rotorläget (tillstånd)	rad
u	Insignalvektorn för tillståndsekvationen	
u_0	Nollföljdsspänningen	V
u_a, u_b, u_c	Statorspänningarna	kV/V
u_α, u_β	Momentan värdena av fasspänningen i $\alpha\beta$ -systemet	V
u_d	Statorspänningen i d -led	V
u_D	Dämplindningsspänningen i d -led (= 0)	V
u_f	Fältspänningen överreducerad till statorsidan	kV/V
$u_f^{nom}, u_{f_{bas}}$	Nominell fältspänning, se även U_{fas}	V
u_{f0}	Fältspänningen vid märkspänning och tomgång	V
U_{fas}	RMS-värdet för fasspänningen	V
U_N	RMS-värdet för nominell huvudspänning	kA

Beteckning	Benämning	Enhet
u_q	Statorspänningen i q -led	V
u_{q0}	Statorspänningen i q -led vid tomgång	V
u_Q	Dämpspänningen i q -led (1x dämplindning) (= 0)	V
u_{Q_1}, u_{Q_2}	Dämpspänningarna i q -led (2x dämplindningar) (= 0)	V
u_s	Statorspänningen i $dq0$ -planet	V
V, V_k	Spänningsnoderna ur tomgångskurvan	
V_A, V_B, V_C	Potentialerna på statorklämmorna (primärsidan)	kV
V_a, V_b, V_c	Potentialerna på statorklämmorna (sekundärsidan)	kV
V_{F+}, V_{F-}	Potentialerna på fältlindningsklämmorna	kV
V_N	Potentialen på neutralklämman	kV
ω	Elektriska vinkelhastigheten (tillstånd)	rad/s
ω	Mekaniska vinkelhastigheten (utsignal)	$p.u./rad/s$
ω_{ext}	Mekaniska vinkelhastigheten (insignal)	$p.u./rad/s$
ω_m	Mekaniska vinkelhastigheten	rad/s
ω_N, ω_0	Nominell vinkelhastigheten	rad/s

Kapitel 1

Inledning

1.1 Problembakgrund

Vid utveckling av AC- och DC-system (t.ex. kraftmatning till isolerade och svaga nät samt kraftelektronik och motordrifter) används transientsimuleringsprogrammet EMTDC. För dessa simuleringar är det nödvändigt att ha tillgång till bra modeller. Befintliga modeller för synkronmaskiner saknar roterande matare och därmed möjligheten att i EMTDC simulera en fältlindning med elektrisk bakgrund. Ytterligare ett problem i befintliga modeller är att neutralkretsen är implementerad internt och modellen kan därför ej användas med neutralledare i uppkopplingar med externa skyddskretsar. Vidare är det ett problem att det sätt som interpoleringen av tomgångskurvan är implementerad i befintliga modeller går det inte att testa alternativa metoder eller anpassa mot särskilda krav och önskemål.

Sist, men definitivt inte minst, så är den befintliga modellens implementeringen inte helt känd, detta på grund av att källkoden är inte tillgänglig. Med en egenutvecklad modell med öppen källkod ges goda möjligheter till vidareutveckling och specialanpassningar. Dessutom är det enklare att kontrollera hur olika delar av modellen är implementerade.

1.2 Syfte

Målsättningen med examensarbetet är att implementera en synkronmaskinmodell med möjlighet till elektrisk fältlindningsmatning och med möjlighet att externt ansluta maskinens neutralpunkt mot exempelvis en impedans till jord. Vidare är avsikten att modellen ska komplettera befintliga modeller i EMTDC och den bör därför innefatta de befintliga modellernas huvudegenskaper.

1.3 Tillvägagångssätt

En enkel Parkmodell med fem tillstånd tas fram. Modellen är omättad, d.v.s. med strömoberoende induktanser, och implementeras i Simulink. Simulerade stationära värden verifieras mot

teoretiska värden. Den enkla modellen lyfts över till EMTDC och för att kontrollera implementeringen i EMTDC verifieras denna mot modellen i Simulink. Modellutökningar i EMTDC i form av fler lindningar, nollföljdsrets och extern styrning av hastighet, implementeras. Varje utökning verifieras i huvudsak mot den befintliga modellen i EMTDC, både stationärt och med momentsteg.

Modellen utökas även med mättning genom implementering av strömberoende induktanser. Utökningen med en ickelinjär magnetiseringsinduktans, d.v.s. magnetisk mättning för magnetiseringsinduktansen, sker utifrån en återskapad tomgångskurva. Interpoleringsmetoden utreds noggrant utifrån ställda krav. Utökningen integreras med den linjära modellen och verifieras slutligen mot befintlig EMTDC-modell.

Teorin bakom modellen tas fram genom litteraturstudier och med hjälp av kunniga handledare inom aktuella områden. Mjukvaruutvecklingen sker i Fortran och i MATLAB.

1.4 Avgränsningar

Modellen avser inte att simulera någon annan mättad induktans än magnetiseringsinduktansen i d -led. Någon elektrisk matare implementeras inte, då ett elektrisk gränssnitt till fältlindning enkelt kan matas från ett nät i EMTDC. Implementeringen är avsedd för användning i PSCAD/EMTDC V3 och därmed utförs inte någon verifiering i V2.

1.5 Rapportdisposition

Detta kapitel ger bakgrunden till den nyutvecklade synkronmaskinmodellen i EMTDC.

I kapitel 2 beskrivs maskinmodellens spännings-, flödes- och tillståndsekvationer. Maskinmodellens definitioner tillsammans med ekvationerna mynnar ut i modellens ekvivalenta scheman.

Modellen, för vilken hänsyn tas till strömberoende induktanser, beskrivs i kapitel 3. Här redovisas teorin för en strömberoende induktans och dess koppling till maskinens tomgångskurva. Återskapningen av tomgångskurvan sker med hjälp av kubisk interpolering och den strömberoende induktansens ekvationer visas. Slutligen visas skillnaderna mellan modellerna med strömberoende respektive linjära induktanser med avseende på tillståndsmodellens induktansmatris.

Kapitel 4 beskriver implementeringen av synkronmaskinmodellen i både MATLAB/Simulink och EMTDC. Här redogörs för programstrukturer, gränssnitt mellan den grafiska komponenten och modellen samt olika konfigureringar.

Resultatet redovisas i kapitel 5. Modellerna jämförs med varandra och mot en befintlig synkronmaskinmodell i EMTDC. Modellens olika konfigureringsalternativ verifieras, både för stationära tillstånd och för steg.

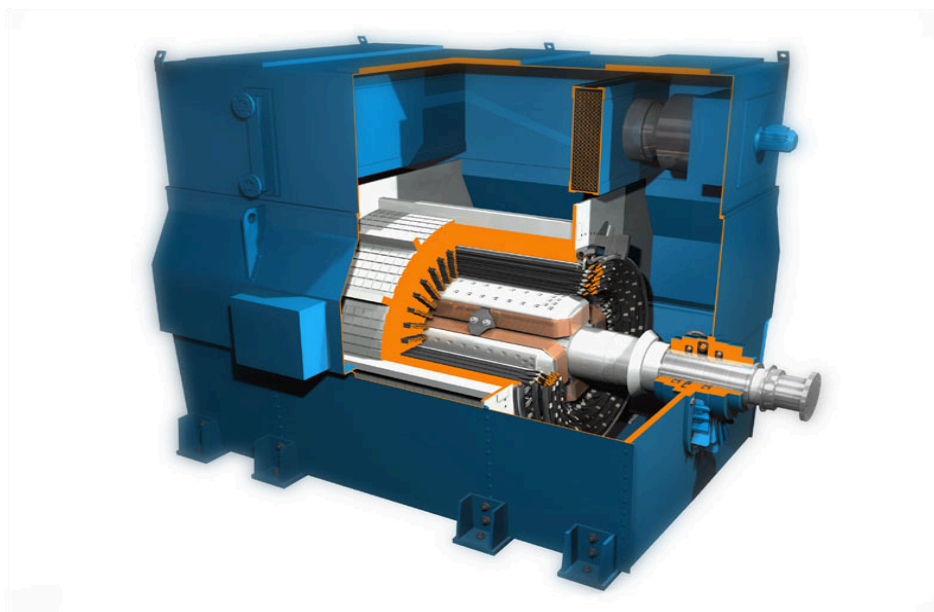
I kapitel 6 redogörs för slutsatserna och i avsnitt 6.1 föreslås fortsatt utveckling av modellen.

Kapitel 2

Maskinmodell utan mättning

Synkronmaskinen består till sin uppbyggnad av en stator med ankarlindningar och en rotor med fältlindning. Maskinen matas med växelspanning och styrs med likspänning i rotorkretsen. Själva statorn är fixerad medan den bildade mmk-vågen roterar i statorns ankarlindning. Statorlindningen är symmetriskt trefasig samt approximativt sinusformigt utbredd. Rotorn kan matas antingen via släppringar och kol eller borstlöst via induktion och likriktardioder. Förutom fältlindning finns även en eller flera dämplindningar i rotorn. Dämplindningarna ger maskinen viss rotorstabilitet och strömbegränsar vid transienter. Dämplindningar är dessutom en förutsättning för att kunna direktstarta en synkronmotor från elnätet. Det bör dock påpekas att synkronmaskinen (-generatorn) vanligast fasis in på nätet.

Tack vare synkronmaskinens höga verkningsgrad är det den vanligast förekommande elmaskinen, för effektgenerering och stora elmotorer. Den har högre verkningsgrad än både asynkronmaskinen och likströmsmaskinen.



Figur 2.1: Uppskuren vy av en högspänningssynkronmotor med utpräglade poler.

2.1 Modelldefinitioner

Den tänkta synkronmaskinmodellen antas ha sinusformigt utbredda lindningar och utpräglade poler för rotorn. I detta kapitel beaktas inte järnförluster och ej heller magnetisk mätning. Sålunda kommer den tänkta modellen initialt endast att simuleras med linjära induktanser. Modellen antas dessutom vara temperaturoberoende samt linjärt frekvensberoende.

Den tänkta tillämpningen av modellen kommer att innefatta såväl stationära som transienta processer. Modellen bygger därför på ett tvåfasigt rotororienterat ($dq0$ -)koordinatsystem, vilket medför att grundtonsväxelstorheter blir likstorheter i stationärdrift. Detta ger en avsevärd förenkling eftersom flödesekvationerna då är oberoende av rotorpositionen. Modellen kan därför enklare modelleras, speciellt om maskinen har utpräglade poler. Modellen omfattar mekanisk dynamik med tröghetsmoment.

Att via en flagga koppla ur modellens mekaniska rotordynamik och tillåta en extern styrning av rotorhastigheten. Detta är framförallt användbart vid komplexa lastmodeller. Genom styrning av maskinmodellens hastighet utifrån kan mera komplexa system av dynamiska massor användas. Konkret innebär det att modellens egna mekaniska ekvationer lyfts ut till en extern modell. I de fall där en konstant hastighet erfordras kan detta enkelt lösas via en flagga i komponenten.

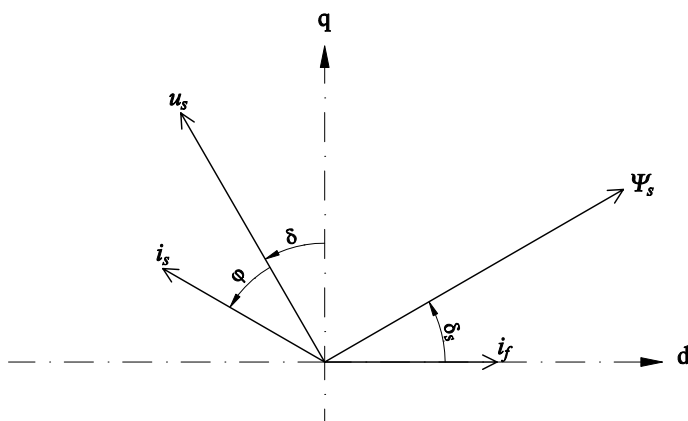
I modellen ges möjligheten att använda antingen enkla dämpindningar i d - respektive q -led, eller en enkel dämpindning i d -led och dubbla dämpindningar i q -led. I och med detta kan tillståndsmodellen enkelt lösas i alla fall.

2.1.1 Referenser och vektorrepresentation

Modellen har motoriska referenser, d.v.s. strömmen in i modellen är positiv, och en vektorrepresentation där d - och q -led är positivt orienterad (q -axeln ligger 90° före d -axeln), se figur 2.2. En positiv vinkelhastighet ω ger en rotation moturs samt ett inkrementellt θ . Lastvinkeln δ definieras som vinkeln mellan vektorn u_s och q -axeln i det övre halvplanet. Ett motoriskt positivt moment T medför en positiv vinkel δ .

Statorlindningen respektive dämpindningen delas upp i d -led och q -led. Statorläckflödena i d - och q -led förutsätts vara symmetriska. Fältlindningen såväl som dämpindningen överreduceras[1] till statorsidan, och lindningsförhållandet $\frac{n_f}{n_{\alpha\beta}}$ mellan fältlindningen och den tvåfasiga statorlindning, antas vara $n : 1$. (Lindningsförhållandet mellan lindningarna i d - och q -led $\frac{n_d}{n_q}$, antas vara $1 : 1$.) Enligt bilaga A kan trefasspänning och ström transformeras över till dq -systemet. Dessa storheter kan sedan transformeras tillbaka till abc -systemet.

Av figur 2.3 framgår att positiv rotationsriktning liksom vinkelhastighet är definierad moturs. Definitionen på rotorns läge θ ses här som vinkeln från α -axeln till rotorns symmetriaxel d . Utifrån figuren formuleras spännings- och flödesekvationerna enligt Loumi [6].



Figur 2.2: Spännings-, ström- och flödesvektorer i $dq0$ -systemet. Modellen som motor med last i stationärtillstånd, producerandes reaktiv effekt.

2.1.2 Spänningsekvationer

Spänningsekvationerna i $dq0$ -systemet framgår av ekvationerna 2.1 – 2.6. Då dämpplindningarna är kortslutna medför detta att dämpplindningsspänningarna är lika med noll. Där flödena tecknas i avsnitt 2.1.3.

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (2.1)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (2.2)$$

$$u_D = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

$$u_Q = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad (2.5)$$

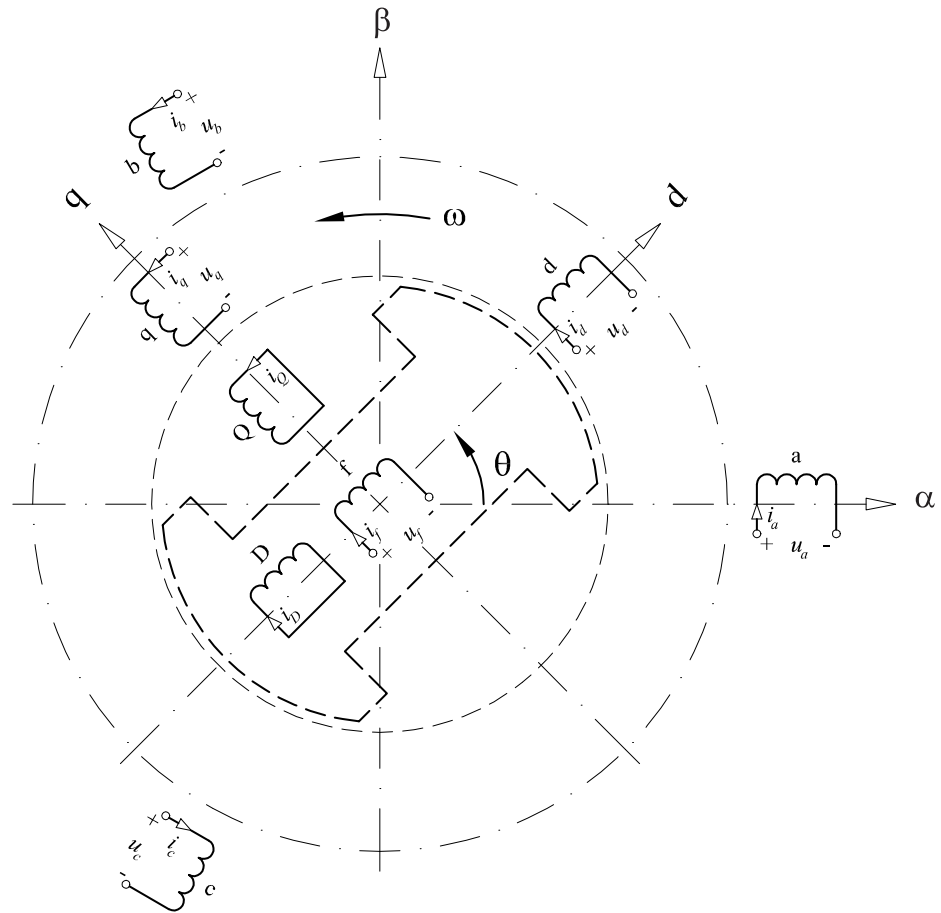
$$u_0 = R_s i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (2.6)$$

Om modellen konfigureras för dubbla dämpplindningar i q -led, ersätts beteckningarna i ekvation 2.4 av de i ekvation 2.7. Dessutom tillkommer spänningsekvation 2.8.

$$u_{Q_1} = R_{Q_1} i_{Q_1} + \frac{d\psi_{Q_1}}{dt} = 0 \quad (2.7)$$

$$u_{Q_2} = R_{Q_2} i_{Q_2} + \frac{d\psi_{Q_2}}{dt} = 0 \quad (2.8)$$

Nollföljdsretsens impedans antas vara lika som statorlindningens impedans. Detta medför att nollföljdsresistansen motsvaras av statorresistansen R_s liksom nollföljdsinduktansen motsvaras av läckinduktansen i statorn $L_{s\sigma}$.



Figur 2.3: De fiktiva, sinusformigt utbredda lindningarna i dq -systemet. Rotorlindningarna ligger innerst, inom den streckade cirkeln. Utanför dessa ligger de roterande statorlindningarna och ytterst de stationära trefaslindningarna.

2.1.3 Flödesekvationer

Den magnetiska kopplingen mellan lindningarna i d -led förutsätts vara magnetiseringsinduktansen L_{md} , enligt ekvation 2.9. Inga korskopplingstermer eller korsvis länkat flöde antas, se ekvation 2.10. För den i q -led magnetiska kopplingen L_{mq} , se ekvation 2.11, gäller motsvarande som för magnetiseringsinduktansen id -led.

$$L_{md} = L_{dD} = L_{fD} = L_{df} \quad (2.9)$$

$$0 = L_{qd} = L_{dq} \quad (2.10)$$

$$L_{mq} = L_{qQ} \quad (2.11)$$

Lindningarnas flöden tecknas här med de ekvivalenta storheterna enligt:

$$\text{statorflöde i } d\text{-led} \quad \psi_d = L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_D \quad (2.12)$$

$$\text{fältlindningsflöde i } d\text{-led} \quad \psi_f = L_{md} i_d + L_f i_f + L_{md} i_D \quad (2.13)$$

$$\text{dämplindningsflöde i } d\text{-led} \quad \psi_D = L_{md} i_d + L_{md} i_f + L_D i_D \quad (2.14)$$

$$\text{dämplindningsflöde i } q\text{-led} \quad \psi_Q = L_Q i_Q + L_{mq} i_q \quad (2.15)$$

$$\text{statorflöde i } q\text{-led} \quad \psi_q = L_{mq} i_Q + L_q i_q \quad (2.16)$$

$$\text{nollföljdsflöde} \quad \psi_0 = L_{s\sigma} i_0 \quad (2.17)$$

Vid dubbla dämplindningar i q -led, ersätts ekvation 2.15 av flödesekvationerna 2.18 – 2.19. Flödet i q -led beror även det av den andra dämplindningen, varför ekvation 2.16 ersätts av 2.20.

$$\psi_{Q_1} = L_{Q_1} i_{Q_1} + L_{mq} i_{Q_2} + L_{mq} i_q \quad (2.18)$$

$$\psi_{Q_2} = L_{mq} i_{Q_1} + L_{Q_2} i_{Q_2} + L_{mq} i_q \quad (2.19)$$

$$\psi_q = L_{mq} i_{Q_1} + L_{mq} i_{Q_2} + L_q i_q \quad (2.20)$$

Från flödesekvationerna får vi följande samband för induktanserna.

$$L_d = L_{md} + L_{s\sigma} \quad (2.21)$$

$$L_f = L_{md} + L_{f\sigma} \quad (2.22)$$

$$L_D = L_{md} + L_{D\sigma} \quad (2.23)$$

$$L_Q = L_{mq} + L_{Q\sigma} \quad (2.24)$$

$$L_q = L_{mq} + L_{s\sigma} \quad (2.25)$$

För dubbla dämplindningar i q -led ges i stället de sammansatta dämplindningsinduktanserna av ekvation 2.26 – 2.27.

$$L_{Q_1} = L_{mq} + L_{Q_1\sigma} \quad (2.26)$$

$$L_{Q_2} = L_{mq} + L_{Q_2\sigma} \quad (2.27)$$

Respektive index betydelse framgår i tabell 2.1 och tabell 2.2.

Index	Kopplad till flöde/lindning	Index	Kopplad till flöde/lindning
abc	statorlindningen, 3-fas	n	neutralkretsen, 3-fas
$\alpha\beta$	statorlindningen, 2-fas	0	nollföljdsretsen, 2-fas

Tabell 2.1: Sammanställning över de index som används i det stationära koordinatsystemet.

Index	Kopplad till flöde/lindning	Index	Kopplad till flöde/lindning
d	statorlindningen i d -led	m	luftgapsflödet
f	fältlindningen i d -led	s	statorlindningen
D	dämplindningen i d -led	σ	läckflödet i en lindning
Q	dämplindningen i q -led		
q	statorlindningen i q -led		

Tabell 2.2: Sammanställning över de index som används i det roterande koordinatsystemet.

Förutom läckinduktansen $L_{s\sigma}$ i statorn förekommer även dq -statorlindningarna med index s , i de alternativa beteckningarna L_{sd} respektive L_{sq} . Dessa beteckningar förekommer framför allt i programkod.

Dämplindningen/-arna i q -led betecknas olika, beroende på om modellen konfigureras för en eller två av dessa. En enkel dämplindning i q -led betecknas med index Q medan dubbla dämplindningar även ges ett ordningsnummer, Q_1 respektive Q_2 .

Uppmärksamma att förutom nollföljdsstorheterna betecknas även storheter i tomgång med index 0. För att undvika förväxling ges index 0 för tomgång som ett tilläggindex. Statorspänningen i tomgång betecknas således u_{s0} . Iakttag även skillnaden mellan t.ex. nominell ström, vilken kan anges som I_N , och strömmen i neutralledaren, vilken kan anges som I_n .

2.1.4 Momentekvationer

För enkla dämplindningar ger det elektriska momentet T_{el} och motorns tröghetsmoment J , det mekaniska momentet T_m , enligt ekvationerna 2.28 – 2.29. Notera även att T_{el} är beroende av antalet polpar. Tröghetsmomentet J [kgm^2] i normerad form definieras av H [$\frac{MW_s}{MVA}$], enligt ekvation 2.30.

$$T_m = T_{el} - \frac{J}{p} \frac{d\omega_{el}}{dt} \quad (2.28)$$

$$T_{el} = \frac{3}{2} p \left((L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_D) i_q - (L_q i_q + L_{mq} i_Q) i_d \right) \quad (2.29)$$

$$J = 2H \frac{S_N}{\omega^2} \quad (2.30)$$

I och med att det elektriska momentet beror av flödet i q -led, ges det elektriska momentet vid dubbla dämpvindningar i q -led av ekvation 2.31. Denna ekvation ersätter då ekvation 2.29.

$$T_{el} = \frac{3}{2}p \left((L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_D) i_q - (L_q i_q + L_{mq} i_{Q_1} + L_{mq} i_{Q_2}) i_d \right) \quad (2.31)$$

Den mekaniska hastigheten ω_m definieras som $\frac{d\theta_m}{dt}$, se ekvation 2.32. Märk att den elektriska vinkelhastigheten ω_{el} inte nödvändigtvis är detsamma som ω_m , utan även beror av antalet polpar p , se ekvation 2.33.

$$0 = \frac{d\theta_m}{dt} - \omega_m \quad (2.32)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_{el}}{p} \quad (2.33)$$

Styrs modellen av ett system av dynamiska massor eller med låst rotorhastighet, åsidosätts modellens interna momentberoende. Momentekvationen 2.28 ersätts av ekvation 2.34, där ω_{ext} är en extern insignal.

$$\omega_{el} = p\omega_{ext} \quad (2.34)$$

Detta medför att modellens rotorhastighet internt blir oberoende av pålagt moment. På detta sätt tillåts hastigheten styras antingen externt, med exempelvis system av massor, eller internt, låst till en konstant hastighet (ω_N).

2.1.5 Ekvationer i stationärtillstånd

För stationärtillstånd elimineras flödesderivator och dämpströmmar, vilket förenklar flödes- och spänningsekvationerna 2.1 – 2.17 enligt ekvationerna 2.35 – 2.39.

$$u_d = R_s i_d - \omega \psi_q \quad (2.35)$$

$$u_f = R_f i_f \quad (2.36)$$

$$u_q = R_s i_q + \omega \psi_d \quad (2.37)$$

$$\psi_d = L_d i_d + L_{md} i_f \quad (2.38)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (2.39)$$

Per definition sätts fältspänningen och fältströmmen i tomgång till 1.0 $p.u.$ Detta ger att det är inte samma bas för fältspänning och fältström, som för övriga spänningar och strömmar. Fältspänningsbasen definieras i tomgång[8], enligt ekvation 2.40, vilken härletts ur ekvationerna 2.36 – 2.38. För tomgång ligger vektorn \vec{u}_s längs q -axeln, se ekvation 2.42. Observera dock att ström- och spänningsbasen för fältkretsen definieras för den omättade induktansen L_{md} .

$$\left. \begin{array}{l} u_{f0} = R_f i_{f0} \\ u_{q0} = \omega_0 \psi_{d0} \\ \psi_{d0} = L_{md} i_{f0} \end{array} \right\} \Rightarrow u_{f_{bas}} = \frac{R_f u_{q0}}{\omega_0 L_{md}} \quad (2.40)$$

$$i_{d0} = i_{q0} = i_{D0} = i_{Q0} = 0 \quad (2.41)$$

$$u_{q0} = |u_s| \quad (2.42)$$

Dämpströmmarna har i stationärtillstånd inte någon inverkan på det elektriska momentet, se ekvation 2.43. Den mekaniska effekten definieras enligt ekvation 2.44. Den aktiva och reaktiva effekten definieras enligt ekvationerna 2.45 – 2.47.

$$T_{el} = \frac{3}{2}p \left((L_d - L_q)i_d i_q + L_{md} i_f i_q \right) \quad (2.43)$$

$$P_m = \omega T_{el} \quad (2.44)$$

$$P_{el} = \frac{3}{2}p (u_d i_d + u_q i_q + u_0 i_0) \quad (2.45)$$

$$P_{fl} = \frac{3}{2}p (i_d^2 + i_q^2 + i_0^2) R_s \quad (2.46)$$

$$Q_{el} = \frac{3}{2}p (u_d i_q - u_q i_d) \quad (2.47)$$

Nedan ges två olika definitioner av den mekaniska effekten. Ekvation 2.48a beror av både spänningar och strömmar medan ekvation 2.48b endast beror av strömmarna (eller momentet).

$$P_m = P_{el} - P_{fl} \quad (2.48a)$$

$$P_m = \omega T_{el} \quad (2.48b)$$

2.1.6 Tillståndsmodell

Spännings- och flödesekvationerna uttryckt på tillståndsform[5] visas med matrisnotation[12] i ekvation 2.49. Genom att lösa ut $\frac{d}{dt}\mathbf{i}$ fås ekvationen på formen $\frac{dx}{dt} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u$, vilket resulterar i ekvation 2.50.

$$\mathbf{u} = \mathbf{L} \frac{d}{dt} \mathbf{i} + (\mathbf{R} + \omega \mathbf{G}) \mathbf{i} \quad (2.49)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1} (\mathbf{R} + \omega \mathbf{G}) \mathbf{i} + \mathbf{L}^{-1} \mathbf{u} \quad (2.50)$$

För enkla dämplindningar i d - och q -led samt intern mekanisk dynamik, ges på denna form åtta tillstånd. Sex av tillstånden är strömmar, ett är vinkelhastighet ω_{el} och ett är position θ . Tillståndsvektorn ser då ut enligt ekvation 2.51. Ingångsvektorn, enligt ekvation 2.52, får på motsvarande sätt åtta insignaler. Sex av insignalerna är spänningar i $dq0$ -planet, en det mekaniska momentet T_m och den åttonde som sätt till noll, se ekvationerna 2.1 – 2.6, 2.28 och 2.32.

$$\mathbf{i} = \left[i_d \ i_f \ i_D \ i_Q \ i_q \ i_0 \ \omega_{el} \ \theta \right]^T \quad (2.51)$$

$$\mathbf{u} = \left[u_d \ u_f \ 0 \ 0 \ u_q \ u_0 \ T \ 0 \right]^T \quad (2.52)$$

För dubbla dämplindningar i q -led tillkommer ett tillstånd och en insignal. Detta ger att tillstånds- och ingångsvektorn i stället ser ut enligt ekvation 2.53 respektive ekvation 2.54.

$$\mathbf{i} = \left[i_d \ i_f \ i_D \ i_{Q_1} \ i_{Q_2} \ i_q \ i_0 \ \omega_{el} \ \theta \right]^T \quad (2.53)$$

$$\mathbf{u} = \left[u_d \ u_f \ 0 \ 0 \ 0 \ u_q \ u_0 \ T \ 0 \right]^T \quad (2.54)$$

Om modellen konfigureras för direktstyrd rotorhastighet ersätts det mekaniska momentet T i insignalvektorerna 2.52 och 2.54 med hastigheten ω_m , enligt ekvation 2.34. Tillståndsvektorn \mathbf{i} påverkas däremot inte.

Induktans- och resistansmatriser för enkla dämplindningar

Med enkla dämplindningar ges induktansmatrisen \mathbf{L} , se ekvation 2.55, av flödesekvationerna i avsnitt 2.1.3. Induktanserna som relateras till d -led, sammanställs i ekvation 2.56. Motsvarande induktanser i q -led sammanställs i ekvation 2.57.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{dfD} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{dfD} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{dfD} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{Qq} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{Qq} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{s\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{J}{p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

$$\mathbf{L}_{dfD} = \begin{bmatrix} L_d & L_{md} & L_{md} \\ L_{md} & L_f & L_{md} \\ L_{md} & L_{md} & L_D \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

$$\mathbf{L}_{Qq} = \begin{bmatrix} L_Q & L_{mq} \\ L_{mq} & L_q \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Behovet av inversen till induktansmatrisen för lösning av tillståndsmodellen framgår av ekvation 2.50. Inversen \mathbf{L}^{-1} , enligt ekvation 2.58, fås genom *Jacobi's metod* [10]. I och med att \mathbf{L} är en gles matris, är inversen analytiskt framtagen genom boxinvertering. Induktansmatrisen i d -led respektive i q -led, \mathbf{L}_{dfD} och \mathbf{L}_{Qq} , kan således inverteras var för sig, se ekvationerna 2.59 – 2.60. Nämnarna k_1 respektive k_2 i ekvationerna, uttrycks i ekvation 2.61 respektive 2.62.

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{dfD}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{dfD}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{dfD}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{Qq}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{Qq}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{s\sigma}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{p}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$\mathbf{L}_{dfD}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{L_f L_D - L_{md}^2}{k_1} & \frac{L_{md}(L_{md} - L_D)}{k_1} & \frac{L_{md}(L_{md} - L_f)}{k_1} \\ \frac{L_{md}(L_{md} - L_D)}{k_1} & \frac{L_d L_D - L_{md}^2}{k_1} & \frac{L_{md}(L_{md} - L_d)}{k_1} \\ \frac{L_{md}(L_{md} - L_f)}{k_1} & \frac{L_{md}(L_{md} - L_d)}{k_1} & \frac{L_d L_f - L_{md}^2}{k_1} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

$$\mathbf{L}_{\mathbf{Qq}}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{L_q}{k_2} & \frac{-L_{mq}}{k_2} \\ \frac{-L_{mq}}{k_2} & \frac{L_Q}{k_2} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

$$k_1 = L_{md}L_fL_D - (L_{md} + L_f + L_D)L_{md}^2 + 2L_{md}^3 \quad (2.61)$$

$$k_2 = L_QL_q - L_{mq}^2 \quad (2.62)$$

Spänningsekvationerna i avsnitt 2.1.2 ger resistansmatrisen \mathbf{R} och $\omega\mathbf{G}$ -matrisen. Notera att båda termerna \mathbf{R} och \mathbf{G} i tillståndsekvationen 2.50 innehåller tillståndsvariabler, vilket medför att dessa termer inte är konstanta.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ -k_3 & 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$k_3 = L_q i_q + L_{mq} i_Q \quad (2.64)$$

$$k_4 = L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_D \quad (2.65)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & L_{mq} & L_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_d & L_{md} & L_{md} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

I programkoden till modellerna hanteras inte \mathbf{R} -matrisen och $\omega\mathbf{G}$ -matrisen var för sig, utan är ihopslagna och hanteras som en matris, enligt ekvation 2.67.

$$\mathbf{R} + \omega\mathbf{G} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \omega L_{mq} & \omega L_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_d & \omega L_{md} & \omega L_{md} & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ -k_3 & 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Induktans- och resistansmatriser för dubbla dämpindningar i q -led

Den extra dämpindningen i q -led expanderar med dess extra spänningsekvation och ström induktansmatrisen \mathbf{L} . Motsvarande matriser för enkel dämpindning i q -led, ersätts av $\mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{d}}$ respektive $\mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{d}}^{-1}$. Matriserna \mathbf{L} respektive \mathbf{L}^{-1} med dubbla dämpindningar i q -led ser ut, enligt matrisekvationerna 2.68 och 2.70. Observera att k_2 är omdefinierad i ekvation 2.72. I övrigt är inte induktansmatrisen eller dess invers förändrad.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\mathbf{dfD}} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{q}} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{s\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{J}{P} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

$$\mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} L_{Q_1} & L_{mq} & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{Q_2} & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} & L_q \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\mathbf{dfD}}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{q}}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{s\sigma}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{P}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

$$\mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{q}}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{L_{Q_2}L_q - L_{mq}^2}{k_2} & \frac{L_{mq}(L_{mq} - L_q)}{k_2} & \frac{L_{mq}(L_{mq} - L_{Q_2})}{k_2} \\ \frac{L_{mq}(L_{mq} - L_q)}{k_2} & \frac{L_{Q_1}L_q - L_{mq}^2}{k_2} & \frac{L_{mq}(L_{mq} - L_{Q_1})}{k_2} \\ \frac{L_{mq}(L_{mq} - L_{Q_2})}{k_2} & \frac{L_{mq}(L_{mq} - L_{Q_1})}{k_2} & \frac{L_{Q_1}L_{Q_2} - L_{mq}^2}{k_2} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

$$k_2 = L_{Q_1}L_{Q_2}L_q - (L_{Q_1} + L_{Q_2} + L_q)L_{mq}^2 + 2L_{mq}^3 \quad (2.72)$$

Matriserna \mathbf{R} och \mathbf{G} förändras på motsvarande sätt som induktansmatrisen, utifrån spänning- och flödesekvationerna. Den fullständiga matrisen $\mathbf{R} + \omega\mathbf{G}$ för dubbla dämpindningar i q -led,

ser ut enligt ekvation 2.73.

$$\mathbf{R} + \omega \mathbf{G} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \omega L_{mq} & \omega L_{mq} & \omega L_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{Q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{Q_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_d & \omega L_{md} & \omega L_{md} & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

$$k_3 = L_q i_q + L_{mq} i_{Q_1} + L_{mq} i_{Q_2} \quad (2.74)$$

$$k_4 = L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_D \quad (2.75)$$

Induktans- och resistansmatriser för direktstyrd rotorhastighet

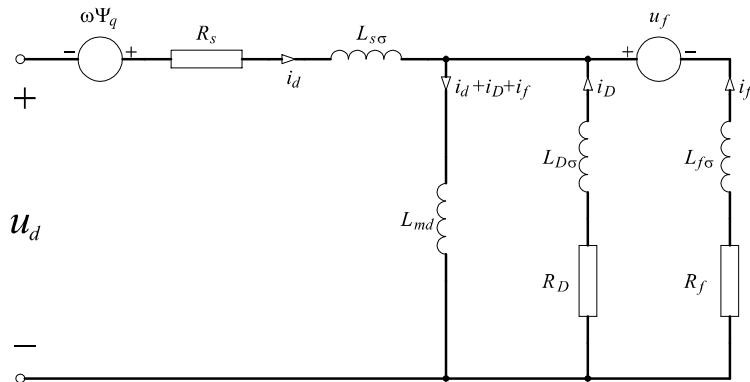
Vid direktstyrning av varvtalet, se avsnitt 2.1.4, sätts rotorhastigheten av en insignal och ersätter därmed momentsignalen. De mekaniska ekvationerna kopplas ur. Ekvationerna för direktstyrning visas här för dubbla dämplingningar i q -led. Direktstyrning är dock även tillämplig för enkla dämplingningar. Med ovan nämnda förändring ger detta att matriserna \mathbf{L} och \mathbf{L}^{-1} ser ut enligt ekvation 2.76. $\mathbf{R} + \omega \mathbf{G}$ förändras här, enligt ekvation 2.77.

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{dfD}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{QQq}^{-1} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{s\sigma}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

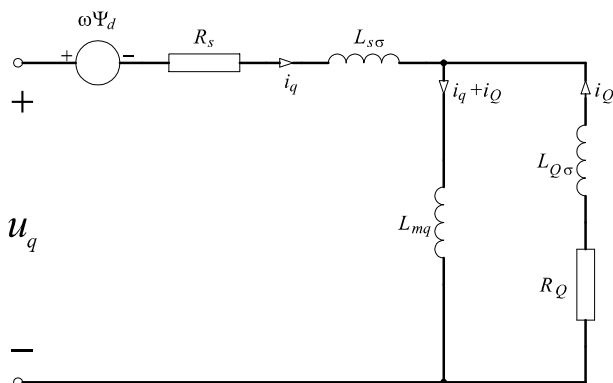
$$\mathbf{R} + \omega \mathbf{G} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \omega L_{mq} & \omega L_{mq} & \omega L_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{Q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{Q_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_d & \omega L_{md} & \omega L_{md} & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

2.2 Ekvivalenta scheman

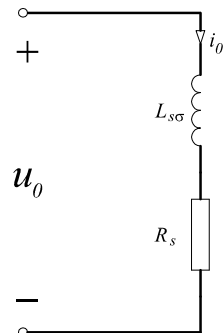
Utifrån spännings- och flödesekvationerna 2.1 – 2.17 sätts ekvivalenta scheman upp för d -led respektive q -led samt nollföljds-kretsen. I figur 2.4 visas det ekvivalenta schemat för d -led. Motsvarande schema för enkel dämplindning i q -led visas i figur 2.5. Nollföljds-komponenten återges schemamässigt i figur 2.6, med respektive serieinduktans. För alternativet med dubbla dämplindningar utökas schemat i q -led, enligt figur 2.7.



Figur 2.4: Ekvivalenta schemat i d -led.



Figur 2.5: Ekvivalenta schemat för enkel dämplindning i q -led.

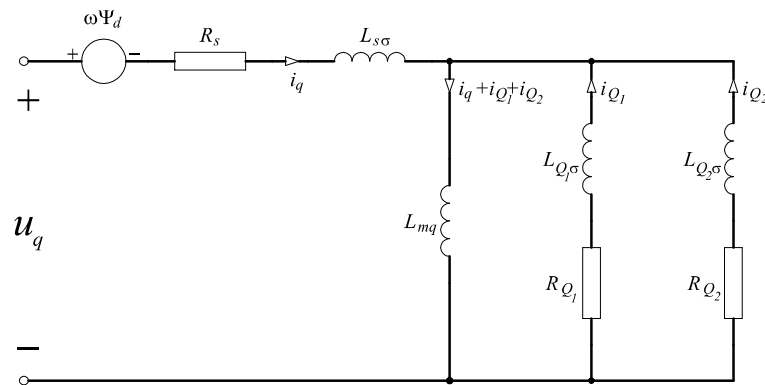


Figur 2.6: Ekvivalenta schemat för nollföljds-kretsen.

2.3 Sammanfattning

Maskinmodellen fungerar som en strömkälla, med spänningen som insignal och strömmen som utsignal. Ett mekaniskt axelmomentet ges som en insignal. Vinkelhastigheten och det elektriska momentet ges som utsignaler. Moment och mekanisk hastighet beror även av antalet polpar.

Maskinens massa modelleras i form av ett tröghetsmoment, utan friktion och fjäderkrafter. Möjlighet ges även till att koppla bort de mekaniska ekvationerna. Modellen kan då styras



Figur 2.7: Ekvivalenta schemat för dubbla dämplindningar i q -led.

med en externt pålagd hastighet, oberoende av moment. På detta sätt medges simulering med externa massmodeller.

Modellen ligger i ett tvåfasigt rotororienterat koordinatsystem, enligt sk. Park-form ($dq0$ -transform). Ekvationerna sätts upp på tillståndsform och tillstånden integreras med *Euler*-framåt. Modellen har motoriska referenser och förutsätter faktiska enheter, inte i per unit.

I grunden bygger den linjära modellen på tre lindningar i d -led (stator-, fält- och dämplindning) och två lindningar i q -led (stator- och dämplindning). Utökning av modellen medger att en ytterligare dämplindning i q -led går att välja till. Fältlindningen omsätts till statorsidan med lindningsförhållandet mellan rotor och stator. I nollföljds-kretsen motsvaras nollföljds-simpedansen av statorresistansen respektive läckinduktansen.

Kapitel 3

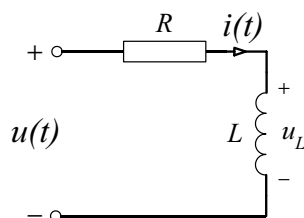
Maskinmodell med magnetisk mättning

Den ferromagnetiska kärnan i en synkronmaskin, precis som i en transformator, mättas för ökande flöde. När flödestätheten i järnet når en viss nivå förändras materialets permeabilitet och sjunker; flödet ges ett ickeinjärt beteende. I en synkronmaskin mättas vanligen järnet mellan tänderna/härvorna i statorn (uppstart och felfall) eller järnet i kanterna på polskorna (normal drift).

3.1 Modelldefinitioner

Den strömberoende modellen definieras på samma sätt som den med linjära induktanser med undantag av magnetiseringsinduktansen i d -led, se kapitel 2. Den linjära modellen beskrevs med linjära induktanser i både d - och q -led, men i den ickeinjära modellen införs här en mättningsberoende induktans. Denna induktans beror av magnetiseringsströmmen i d -led. Alla läck-, fält- och dämpinduktanser, liksom statorinduktansen i q -led, betraktas här som mättningsberoende.

3.1.1 Strömberoende induktans vid mättning



Figur 3.1: En enkel LR-krets.

I en enkel LR-krets, som visas i figur 3.1, ger KVL spänningen u , enligt ekvation 3.1.

$$u = u_L + Ri \tag{3.1}$$

Spänningen över induktansen definieras enligt ekvation 3.2. Om induktansen är strömberoende, definieras flödet genom induktansen enligt ekvation 3.3.

$$u_L = \frac{d\psi}{dt} \quad (3.2)$$

$$\psi(i) = L(i)i \quad (3.3)$$

Derivering av flödet och den strömberoende induktansen samt utveckling med hjälp av kedjeregeln, ger ekvationerna 3.4 – 3.5.

$$u_L = \frac{d\psi(i)}{dt} = \frac{dL(i)}{dt}i + L(i)\frac{di}{dt} \quad (3.4)$$

$$u_L = \frac{d\psi(i)}{di} \frac{di}{dt} = \left(\frac{dL(i)}{di}i + L(i) \right) \frac{di}{dt} \quad (3.5)$$

Av detta följer ekvation 3.6. Strömderivatan av flödet definieras som summan av en *statisk* induktans och en *dynamisk* induktans. Identifiering av *HL* ger följande uttryck:

$$\frac{d\psi(i)}{di} = \frac{dL(i)}{di}i + L(i) \quad (3.6)$$

$$\frac{dL(i)}{di} = L_{DYN} \quad (3.7)$$

$$L(i) = L_{STAT} \quad (3.8)$$

$$\frac{d\psi(i)}{di} = iL_{DYN} + L_{STAT} \quad (3.9)$$

Ur figuren 3.1 inses att en positiv spänning u ger en positiv ström i tillika positiv flödesderivata (u_L). Strömberoendet ger att för ökande ström mätas flödet och den statiska induktansen minskar, vilket resulterar i en negativ dynamisk induktans. Utvecklas och deriveras ekvation 3.9, ges ekvation 3.10. Här av följer sambandet för en icke-singulär lösningen, enligt ekvation 3.11.

$$\frac{di}{dt} = \frac{\frac{d\psi(i)}{dt}}{iL_{DYN} + L_{STAT}} = \frac{u_L}{iL_{DYN} + L_{STAT}} \quad (3.10)$$

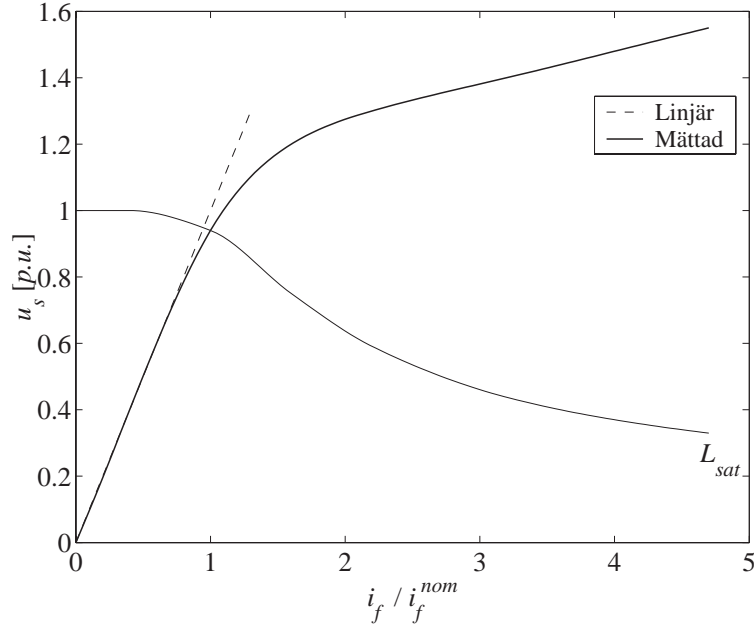
$$L_{STAT} > -iL_{DYN} \quad (3.11)$$

Detta samband, ekvation 3.11, insatt i ekvation 3.9 och utvecklat med kedjeregeln, medför att $\psi(i)$ matematiskt måste vara monotont ökande:

$$\frac{d\psi(i)}{di} > 0 \quad (3.12)$$

3.1.2 Tomgångskurvan

Den mätdata som vanligen finns tillgänglig över maskinens mätningskaraktäristik är tomgångskurvan, se figur 3.2. Den första delen av kurvan, den linjära delen genom origo, motsvarar det omättade området. Resterande del av kurvan utgör det mättade området. I kurvans förlängning, utanför det uppmätta området, approximeras den som en linjär förlängning, vilket kan ses som att flödet huvudsakligen bestäms av luftens permeabilitet.



Figur 3.2: Tomgångskurvan för en synkronmaskin vid nominellt varvtal. Den mättade kurva (heldragen grov linje) visas i jämförelse med den linjära kurvan (streckad linje). Den mättade kurvan ger den strömberoende induktansen (heldragen fin linje).

Utifrån den plottade kurvan avläses ett antal mätpunkter, från vilka kurvan sedan approximativt ska kunna återskapas. De värden som kan avläsas ur kurvan är och skall vara monotont ökande, både vad gäller spänning och ström. Detta medför att en viss given ström motsvarar ett entydigt flöde. Detta ska främst betraktas som ett fysikaliskt randvillkor, ökande ström leder till ökande flöde, men är även som en matematisk förutsättning, vilket visats i föregående avsnitt. Detta medför att för att en given magnetiseringsström kan en entydig induktans bestämmas, se ekvation 3.12.

Den strömberoende induktansen $L(i)$ definieras utifrån tomgångskurvan, enligt ekvation 3.13. Då tomgångskurvan är monoton (ökande) medför det även att kvoten är monoton (minkande).

$$L(i) = \frac{\psi}{I} = \frac{V}{\omega_N I} \quad (3.13)$$

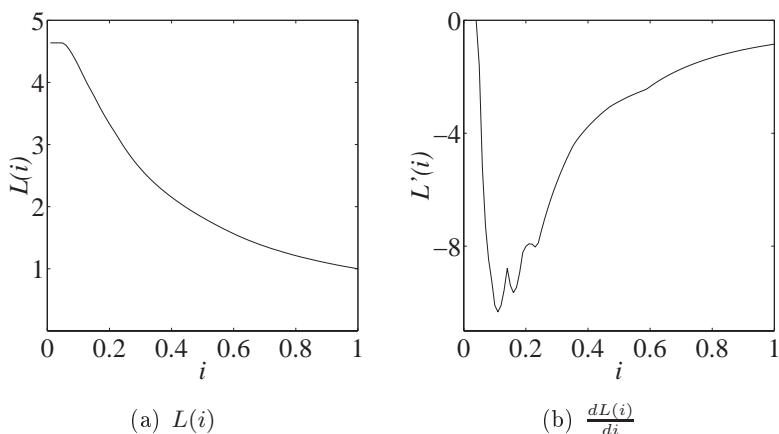
Luftgapsflöset i_{md} genom magnetiseringsinduktansen bestämmer den mättade induktansen $L(i)$ till skillnad från det linjära fallet då magnetiseringsinduktansen i d -led inte har något strömberoende, se ekvation 3.14.

$$i_{md} = i_d + i_f + i_D \quad (3.14)$$

Då kurvan anges i per unit följer att spänningen och flödet är ekvivalenta, ty $\omega_N = 1.0$ p.u. I ekvationer och modellimplementeringen förekommer dock båda storheterna normerade och i absoluta värden. Konsekvent används spänningen V för det som relaterar till tomgångskurvan, exempelvis vid beräkning av interpoleringskoefficienter. Motsvarande ekvationer, som bland annat relaterar till användningen av den strömberoende induktansen, betecknas med flödet ψ .

3.1.3 Interpolering

Med givna monotona data återskapas $V(i)$ (eller $\psi(i)$) med monotont ökande flöde. Utifrån ett antal mätvärden från en tomgångskurva, interpoleras en kurva med hjälp av kubisk Hermite-interpolering. Det ger en följsammare kurva än vid linjär interpolering samt en kontinuerlig derivata.



Figur 3.3: Kubisk Hermite-interpolation av en strömberoende induktans och dess derivata.

En styrka med Hermite-interpolering är att den säkerställer entydig interpolering av kurvan för monotona data. Detta är att föredra, eftersom det inte medges någon möjlighet till grafisk verifiering i modellen. Metoden är kubisk och därför en mer beräkningsintensiv metod än för linjär interpolering.

Andra interpoleringsmetoder eller kurvanpassningar kan användas, se vidare i appendix B. Mätningen är implementerad på så sätt att den lätt kan ersättas av andra metoder, se vidare under avsnitt 4.2.4.

3.2 Ekvationer

Ekvationerna som beskriver den linjära modellen, se avsnitt 2, används även i denna modell. För mätningen tillkommer dock ett antal ekvationer för interpolering och beräkning av den strömberoende induktansen.

3.2.1 Interpoleringskoefficienter

Beräkning av interpoleringskoefficienterna för kubisk Hermite-interpolering sker utifrån från en normaliserad tomgångskurva. Det kubiska polynomet visas i ekvation 3.15 och dess derivata visas i ekvation 3.16.

$$V(I) = \alpha_1 + \alpha_2 I + \alpha_3 I^2 + \alpha_4 I^3 \quad (3.15)$$

$$\frac{dV(I)}{dI} = \alpha_2 + 2\alpha_3 I + 3\alpha_4 I^2 \quad (3.16)$$

Den första noden på kurvan utgörs av origo $(0, 0)$. Den andra noden som anges, (I'_2, V_2) , ska ligga längs den första, linjära delen av kurvan. Den inmatade tomgångskurvan, IV -kurvan, normaliseras genom en omskalning av I -axeln. V -axel ska redan vara angiven i per unit. I -axeln normaliseras enligt ekvation 3.17 – 3.18, så att den linjära modellens ström vid nominell spänning motsvarar 1.0 *p.u.* Detta visas med den streckade linjen i figur 3.2. I ekvationerna nedan motsvarar I'_k den ickenormerade strömmen i nod k .

$$I_2 = V_2 \quad (3.17)$$

$$I_k = I'_k \frac{V_2}{I'_2} \quad (3.18)$$

Detta medför att kvoten, $\frac{V}{I} = L(i)$, kommer att ge graden av mätning i intervallet $(0, 1]$, där 1.0 motsvarar omättad. För synkronmaskinen definieras magnetiseringsinduktansen för den omättade maskinen.

Hermite-interpoleringen kräver förutom noderna, även dessas derivator. Dessa derivator anges ej vid inmatning av kurvan, utan approximeras genom viktning. Denna kan beräknas genom att låta de till nod k angränsande derivatorna utgöra approximeringen av nodens derivata. Längden (beloppet) mellan noderna ger viktningen av respektive derivata, se ekvation 3.22.

$$\Delta I_k = I_k - I_{k-1} \quad (3.19)$$

$$\Delta V_k = V_k - V_{k-1} \quad (3.20)$$

$$l_k = \sqrt{\Delta I_k^2 + \Delta V_k^2} \quad (3.21)$$

$$\frac{d}{dI} V_k = \frac{\frac{\Delta V_k}{\Delta I_k} l_k + \frac{\Delta V_{k+1}}{\Delta I_{k+1}} l_{k+1}}{l_k + l_{k+1}} \quad (3.22)$$

Interpoleringskoefficienterna gäller inom ett intervall, $I_k \leq I \leq I_{k+1}$. Dessa beräknas för varje intervall, utifrån ekvationerna 3.15 – 3.16. Ekvationerna på matrisform ser ut enligt ekvationerna 3.23 – 3.24, där vektorerna \mathbf{V} och α ges av ekvationerna 3.25 – 3.26.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\alpha = \left[\alpha_{k1} \ \alpha_{k2} \ \alpha_{k3} \ \alpha_{k4} \right]^T \quad (3.25)$$

$$\mathbf{V} = \left[V(I_k) \ V(I_{k+1}) \ \frac{d}{dI} V(I_k) \ \frac{d}{dI} V(I_{k+1}) \right]^T \quad (3.26)$$

Vektorerna \mathbf{V} och α samt matris \mathbf{I} förändras med aktuellt intervall. Inversen \mathbf{I}^{-1} beräknas enligt *Jacobi's method* [10].

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & I_k & I_k^2 & I_k^3 \\ 1 & I_{(k+1)} & I_{(k+1)}^2 & I_{(k+1)}^3 \\ 0 & 1 & 2I_k & 3I_k^2 \\ 0 & 1 & 2I_{(k+1)} & 3I_{(k+1)}^2 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\mathbf{I}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{(3I_k - I_{k+1})I_{k+1}^2}{(I_k - I_{k+1})^3} & \frac{(I_k - 3I_{k+1})I_k^2}{(I_k - I_{k+1})^3} & -\frac{I_k I_{k+1}^2}{(I_k - I_{k+1})^2} & -\frac{I_k^2 I_{k+1}}{(I_k - I_{k+1})^2} \\ -\frac{6I_k I_{k+1}}{(I_k - I_{k+1})^3} & \frac{6I_k I_{k+1}}{(I_k - I_{k+1})^3} & \frac{I_{k+1}(2I_k + I_{k+1})}{(I_k - I_{k+1})^2} & \frac{I_k(I_k + 2I_{k+1})}{(I_k - I_{k+1})^2} \\ \frac{3(I_k + I_{k+1})}{(I_k - I_{k+1})^3} & -\frac{3(I_k + I_{k+1})}{(I_k - I_{k+1})^3} & -\frac{(I_k + 2I_{k+1})}{(I_k - I_{k+1})^2} & -\frac{(2I_k + I_{k+1})}{(I_k - I_{k+1})^2} \\ -\frac{2}{(I_k - I_{k+1})^3} & \frac{2}{(I_k - I_{k+1})^3} & \frac{1}{(I_k - I_{k+1})^2} & \frac{1}{(I_k - I_{k+1})^2} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.2.2 Mättad induktans

Mättningskaraktäristiken interpoleras med hjälp av kubisk Hermite-interpolering. För en normerad tomgångskurva ges flödet, se ekvationerna 3.29 – 3.30, ur ekvationerna 3.15 – 3.16. Ekvationerna 3.3, 3.8 och 3.29, formulerar i sin tur den statiska induktansen, enligt ekvation 3.31. På motsvarande sätt ges den dynamiska induktansen, ekvation 3.32, ur ekvationerna 3.9, 3.30 och 3.31.

$$\psi = \alpha_1 + \alpha_2 i + \alpha_3 i^2 + \alpha_4 i^3 \quad (3.29)$$

$$\frac{d\psi(i)}{di} = \alpha_2 + \alpha_3 i + 2\alpha_4 i^2 \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} L_{STAT} &= \frac{\psi(i)}{i} \\ &= \alpha_1 i^{-1} + \alpha_2 + \alpha_3 i + \alpha_4 i^2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} iL_{DYN} &= \frac{d\psi(i)}{di} - L_{STAT} \\ &= \alpha_2 + 2\alpha_3 i + 3\alpha_4 i^2 - L_{STAT} \\ &= -\alpha_1 i^{-1} + \alpha_3 i + 2\alpha_4 i^2 \end{aligned} \quad (3.32)$$

3.2.3 Tillståndsmodell

Till skillnad från det linjära fallet är inte magnetiseringsinduktansen L_{md} konstant vilket påverkar matriserna i tillståndsekvationen. Dessutom innebär strömberoendet att även matrisen $\mathbf{L}_{d\mathbf{fD}}$ deriveras i lösningen av tillståndsmodellen.

För att skilja den strömberoende induktansen från den linjära, betecknas den strömberoende induktansen som L_{STAT} , se ekvation 3.33. Motsvarande gäller för den sammansatta deriverade induktansen, vilken betecknas enligt ekvation 3.34.

$$L_{STAT} = L_{md}(i) \quad (3.33)$$

$$S_{md} = L_{STAT} + iL_{DYN} \quad (3.34)$$

Induktanserna i matriserna \mathbf{R} och \mathbf{G} påverkas endast av den strömberoende magnetiseringsinduktansen i d -led, enligt följande ekvationerna:

$$L_d = L_{STAT} + L_{s\sigma} \quad (3.35)$$

$$L_f = L_{STAT} + L_{f\sigma} \quad (3.36)$$

$$L_D = L_{STAT} + L_{D\sigma} \quad (3.37)$$

Däremot byts induktanserna i matris \mathbf{L}_{dfD} ut och ersätts av de deriverade mättningsberoende induktanserna enligt nedan:

$$S_d = S_{md} + L_{s\sigma} \quad (3.38)$$

$$S_f = S_{md} + L_{f\sigma} \quad (3.39)$$

$$S_D = S_{md} + L_{D\sigma} \quad (3.40)$$

De strömberoende induktanserna insatt delmatrisen för d -ledet, vilken här betecknas \mathbf{S}_{dfD} , visas i ekvation 3.42. I följande ekvationer framgår utbytet av delmatrisen på normalform och inversform:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{c} \mathbf{S}_{dfD} \end{array} \right] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left[\begin{array}{c} \mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{q}} \end{array} \right] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{s\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{J}{p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\mathbf{S}_{dfD} = \begin{bmatrix} S_d & S_{md} & S_{md} \\ S_{md} & S_f & S_{md} \\ S_{md} & S_{md} & S_D \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{c} \mathbf{S}_{dfD}^{-1} \end{array} \right] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left[\begin{array}{c} \mathbf{L}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}\mathbf{q}}^{-1} \end{array} \right] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{s\sigma}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{p}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$\mathbf{S}_{dfD}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{S_d S_D - S_{md}^2}{k_1} & \frac{S_{md}(S_{md} - S_D)}{k_1} & \frac{S_{md}(S_{md} - S_d)}{k_1} \\ \frac{S_{md}(S_{md} - S_D)}{k_1} & \frac{S_f S_D - S_{md}^2}{k_1} & \frac{S_{md}(S_{md} - S_f)}{k_1} \\ \frac{S_{md}(S_{md} - S_d)}{k_1} & \frac{S_{md}(S_{md} - S_f)}{k_1} & \frac{S_f S_d - S_{md}^2}{k_1} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$k_1 = S_d S_f S_D - (S_d + S_f + S_D) S_{md}^2 + 2 S_{md}^3 \quad (3.45)$$

Ett specialfall av den mättningsberoende induktansen ges av mättningskurvans första linjära del. Där är den strömberoende magnetiseringsinduktansen samma som den linjära magnetiseringsinduktansen i d -led, och derivatan är lika med noll. Här är den icke-linjära induktansmatrisen identisk med den linjära, vilket även utnyttjas i implementeringen. Samma tillståndsmodell kan därför användas för både linjär och mättad modell.

3.3 Sammanfattning

Maskinmodellen modellerar endast mättningsberoende induktans i d -led. Den mättade modellen baseras på den linjära modellen så när som på en icke-linjär induktans. Mättningskurvan ges i form av att magnetiseringsinduktansen i d -led här följer mättningskaraktäristiken, enligt maskinens tomgångskurva.

För den strömberoende induktansen, även kallad statisk induktans, ger flödesderivatan upphov till en dynamisk induktans. För att undvika en ickesingulär lösning, krävs av differentialekvationen för induktansströmmen, att flödet som funktion av strömmen är monotont ökande.

Tomgångskurvan återskapas i första kvadranten genom interpolering av upp till femton monotont ökande noder. Interpoleringen är en sk. Hermite-interpolering, vilken är en kubisk interpolering. Metoden säkerställer en monotont ökande kurva för monotont ökande noder och ger en följsam kurva, till skillnad från t.ex. linjär interpolering, i och med dess kontinuerliga derivata.

Kapitel 4

Implementeringar

Avsikten är att först ta fram en enkel modell i Simulink, för att sedan låta den ligga till grund för vidare implementering i EMTDC. Tanken med att samma modell implementeras i både Simulink och EMTDC är att fel i implementeringen kan rättas på ett tidigt stadium. Detta ger även en referens utan EMTDC-dynamik (styvt nät).

4.1 Linjär Simulink-modell

Simulink anses vara den mest spridda och använda mjukvaran för modellering och simulering av dynamiska system. Simulink använder och är väl integrerad i MATLAB-miljön. För simuleringar finns dels ett bibliotek med användarklara block, dels möjligheten till egenutveckling av dynamiska komponenter.

Som grund för implementeringen väljs den linjära modellen med enkla dämpindningar och isolerad neutralpunkt.

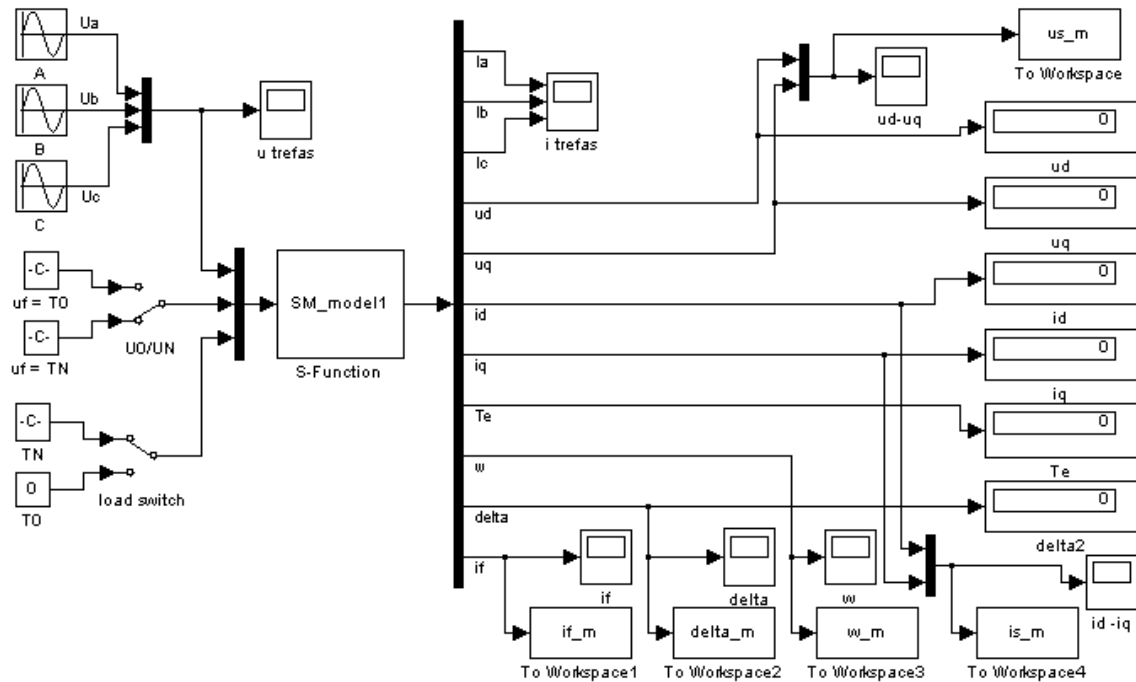
För utveckling och simulering i MATLAB har följande programversioner använts:

- *MATLAB ver. 6.1.0.450, Release 12.1*
- *Simulink ver. 4.1, Release 12.1*

4.1.1 S-funktion

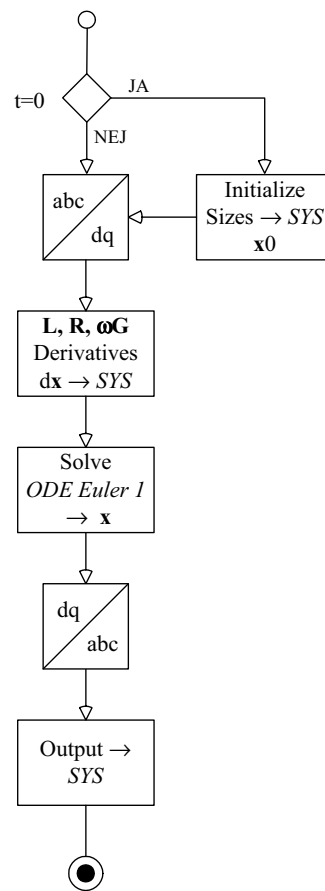
Modellen är uppbyggd som en *S-funktion* (system-function), som är ett programmerbart Simulink-block. Maskinmodellen, Simulink-blocket, är programmerad i MATLAB-kod (m-fil).

Insignalvektorn till S-funktionen består av fem signaler. Tre av signalerna motsvarar spänningen som dynamiska signaler. De två andra signalerna motsvarar fältspänningen och det mekaniska momentet, och ges som konstanter. Uppkopplingen kan ses som att elmaskinen är kopplad till ett styvt nät då spänningsmatningen inte har någon återkoppling (spänningsfall), d.v.s. ett elnät med oändlig kortslutningseffekten. Som utsignalvektor ges alla tillståndsvariabler, lastvinkeln δ , det elektriska momentet T_e samt fasströmmarna i_{abc} . Uppkopplingen med *S-funktionen*, visas i figur 4.1.



Figur 4.1: Signaluppkopplingen för S -funktionen i Simulink.

Programstrukturen för S -funktionen framgår av figur 4.2. Vid tiden $t = 0$ initieras vektorstorlekar och tillståndsvektorn. Transformering från abc - till $dq0$ -planet föregår definitionerna av induktans- och resistansmatriserna. Derivatans lösning ger tillståndsekvationen och sju kontinuerliga tillstånd beräknas. Nollföljdskomponenten är ej implementerad, då modellen endast ska användas med isolerad neutralpunkt. Detta medför att tillståndsvektorn saknar nollföljdströmmen som tillstånd. Vektorn i övrigt ser ut som ekvation 2.51. Inverstransformering sker från $dq0$ - till abc -planet. Resultatvektorn ser ut som 2.52, med undantag av nollföljdskomponenten. Modellen använder ej per unit-värden, utan endast faktiska värden.



Figur 4.2: Programstrukturen för *S-funktionen* i Simulink.

4.2 Modellen i EMTDC (NEFI-modellen)

EMTDC är ett simuleringsprogram för simulering och kontroll av transienta förlopp i elsystem[8]. Namnet EMTDC är ett registrerat varumärke hos Manitoba Hydro. Akronymet står för *Electro-Magnetic Transients in DC systems*, vilket grundar sig i att programmet ursprungligen användes för HVDC-studier. I dag används EMTDC för såväl DC- som för AC-analyser.

EMTDC:s grafiska användargränssnitt är PSCAD. I PSCAD byggs projekten upp med hjälp av komponenter med EMTDC-dynamik. Som komplement till programmets rika komponentbibliotek, finns möjligheten till egenutvecklade komponenter. EMTDC-programmet är skrivet i Fortran och har ett bra stöd för användarutvecklad Fortrankod. Även andra programspråk som C och C++ kan användas. För denna modell används dock Fortran.

De egenutvecklade komponenterna formges i PSCAD medan EMTDC-dynamiken skrivs i Fortrankod. Vid simuleringar kompileras hela projektet i PSCAD tillsammans med komponenternas källkod.

För utveckling och simulering i EMTDC har följande programversioner använts:

- Simuleringsmotor : *EMTDC V3.0.5*
- Projekteditor : *PSCAD V3.0.7*
- Komponenteditor : *Component Workshop v1.0*
- Fortraneditor : *Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.1.0*
- Fortrankompilator : *Digital Fortran 90 v9.x, win32*

Två integrerade modeller har tagits fram i EMTDC, dels den linjära maskinmodellen, dels den mättade maskinmodellen. I följande avsnitt redogörs för implementationen av dessa modeller och dess gränssnitt samt integrationen av modellerna till en och samma, NEFI-modellen¹.

4.2.1 Elektriska gränssnitt

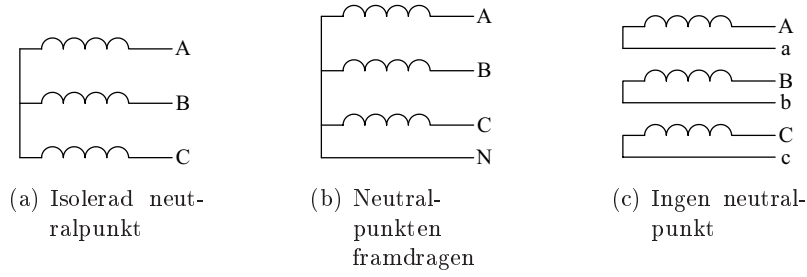
Modellen använder spänningen som insignal och strömmen som utsignal. Spänningarna till modellen beror på aktuella konfiguration. Externt² hanteras spänningar och strömmar i kV och kA medan modellen internt hanterar V och A . Denna skalning sker i gränssnittet mellan EMTDC och Fortran, se vidare under avsnitt 4.2.3.

Trefasmatningen

Spänningen för transformationen till $dq0$ -system, beräknas utifrån anslutningssätt av maskinmodellens neutralpunkt. Potentialerna i ekvationerna nedan framgår av figur 4.3.

¹Neutral and Electrical Field winding Interface

²Nätmodellen i EMTDC bygger på spänningar i kV och strömmar i kA .



Figur 4.3: Olika anslutningssätt av modellens statorlindningar.

Med en isolerad neutralpunkt används potentialen vid anslutningspunkten som spänning, se ekvationerna 4.1 – 4.3.

$$u_a = V_A \quad (4.1)$$

$$u_b = V_B \quad (4.2)$$

$$u_c = V_C \quad (4.3)$$

Om däremot modellen konfigureras för en till klämma framdragen neutral, beräknas spänningen som potentialskillnaden, se ekvationerna 4.4 – 4.6.

$$u_a = V_A - V_N \quad (4.4)$$

$$u_b = V_B - V_N \quad (4.5)$$

$$u_c = V_C - V_N \quad (4.6)$$

Om modellen har båda sidorna på statorlindningarna framdragna till anslutningsklämma motsvarar den transformerade spänningen potentialskillnaden över respektive lindning, enligt ekvationerna 4.7 – 4.9.

$$u_a = V_A - V_a \quad (4.7)$$

$$u_b = V_B - V_b \quad (4.8)$$

$$u_c = V_C - V_c \quad (4.9)$$

Spänningen u_{abc} ger den vektor som transformeras till u_{dq0} i $dq0$ -koordinatsystemet. Koordinattransformationen beskrivs närmare i appendix A.

Inverstransformationen från $dq0$ - till abc -systemet ger strömmarna som ska injiceras i terminalerna. Beroende på anslutningssätt, se figur 4.3, injiceras fasströmmarna enligt ekvationerna:

$$\begin{aligned} i_A &= -i_a \\ i_B &= -i_b \\ i_C &= -i_c \end{aligned} \quad (4.10a)$$

$$\begin{aligned} &\dots \\ i_N &= +i_n \end{aligned} \quad (4.10b)$$

...

$$\begin{aligned}
 i_a &= +i_a \\
 i_b &= +i_b \\
 i_c &= +i_c
 \end{aligned}
 \tag{4.10c}$$

I ekvationerna ovan är VL injiceringsströmmen och HL de inverstransformerade strömmarna. Notera att modellen använder motoriska referenser samt att indexen i VL härrör till anslutningarna, se figur 4.3.

Fältspänningsmatningen

Spänningen över fältlindningen (på klämmorna) ges av ekvation 4.11.

$$u'_f = V_{f+} - V_{f-} \tag{4.11}$$

För de fall där lindningsomsättningen mellan det stationära $\alpha\beta$ - och det roterande dq -systemet inte är 1 : 1, överreduceras fältspänningen till statorsidan. Vid flera fältlindningar i rotorn, fler än ett polpar, antas dessa vara identiska och seriekopplade. Spänningen över varje fältlindning delas jämt och u_f beror därför av omsättningen n samt antalet polpar p enligt ekvation 4.13.

$$n = \frac{n_f}{n_{\alpha\beta}} \tag{4.12}$$

$$u_f = \frac{u'_f}{pn} \tag{4.13}$$

På motsvarande sätt skalas fältströmmen, se ekvation 4.14. Strömmen som injiceras i repektive terminal ges av ekvationerna 4.14 – 4.15.

$$i_{f+} = -\frac{i_f}{n} \tag{4.14}$$

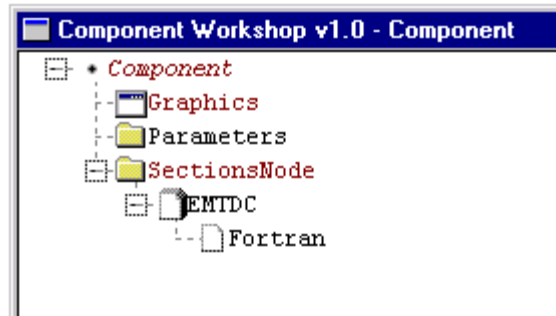
$$i_{f-} = -i_{f+} \tag{4.15}$$

4.2.2 Komponenten

I PSCAD består komponenten av tre delar: en grafisk del (*Graphics*), en formulärdel (*Parameters*) samt ett EMTDC-avsnitt (*SectionsNode - Fortran*), se figur 4.4. I den utvecklade modellen kallas dock *SectionsNode - Fortran* för *SectionsNode - DSDYN*, vilket är komponentens Fortran-gränssnitt. Till komponenten följer även ett hjälpavsnitt med en HTML-baserad komponentbeskrivning. Detta beskrivs utförligare senare i kapitlet.

Den grafiska komponenten

I den grafiska designen av komponenten definieras de elektriska noderna, tillika in- och utsignalerna och deras format. Till skillnad från en in- eller utsignal har en elektrisk nod dels en elektrisk potential, dels en ström som flyter in/ut ur noden. Noden ingår i kretsmatriserna och är en central del av kretsdynamiken.



Figur 4.4: Komponentens struktur i *Component Workshop*

In- och utsignalerna anges med vinkelhakar som anger signalriktningen. Dessa kan valfritt anslutas till andra komponenter, kontroller, mätare etc. De elektriska noderna måste anslutas till andra elektriska komponenter och/eller ledningar.

Beroende på konfiguration ges komponenten olika utseenden för att rätt signaler ska användas, se figurerna 4.5 – 4.6. Konfigurationen sker i komponentens formulär.

Konfigureringsformulär

Formuläret är kopplat till komponenten och blir åtkomligt via komponentinställningarna (*Edit Parameters*). Beskrivning av alla parametrar i formuläret finns som en hjälpfil *Synchronous Machine Model*, se bilaga F, vilken även är åtkomlig via komponenten (*SectionsNode - Help*). I formuläret anges alla parametrar för modellen, dess konfiguration, samt vilka eventuella signaler som skall monitoreras.

Fortrankoden

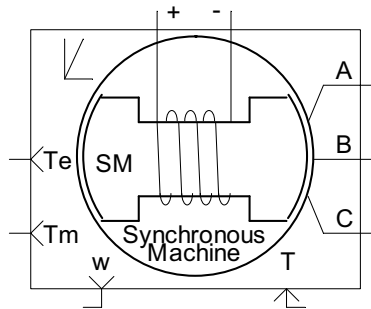
Fortrankoden är skriven med avsikten att passa de båda Fortrandialekterna Fortran 77 samt Fortran 90, dock med några anmärkningar. Det är nödvändigt i aktuell version att vidtaga åtgärder för att koden ska vara kompilleringsbar i Fortran 77. Koden är skriven i formatet *Fortran Fixed Format Source File* men det förekommer även dedicerade funktioner för Fortran 90, bl.a. matrismultiplicering. Dessa funktioner behöver därför skrivas om för att fungera med Fortran 77. Koden är inte heller provkompilerad på en 77 kompilator, och kan därför inte garanteras vara kompilleringsbar för Fortran 77.

Trots att Fortran inte är *case sensitive* är koden skriven med både stora och små bokstäver. Detta ökar, tillsammans med indenteringen, ”läsbarheten”. I och med att Fortran inte är *case sensitive* medför detta att bl.a. induktansen L_d i koden skrivs som L_{sd} och därigenom skiljer sig från L_D .

Komponenten i PSCAD och tillhörande subrutin är två separata filer. Hjälpavsnitt i filen *U_SM0_help.htm* är detta den kompletta komponenten.

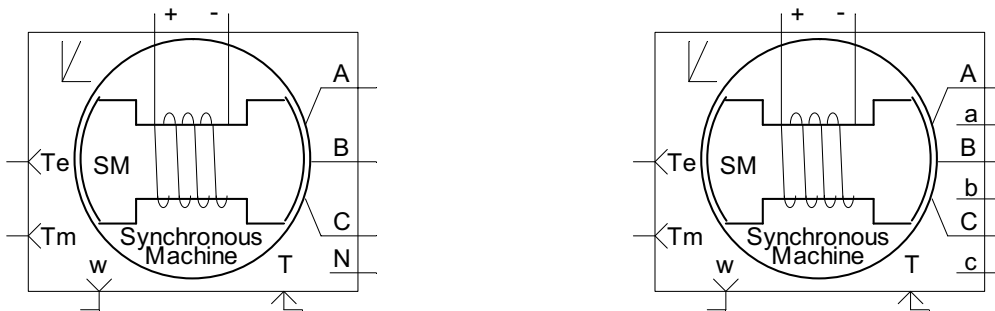
4.2.3 Linjär modell

Elektriskt ansluts komponenten med trefasspänning på huvudklämmorna och med likspänning på fältlindningsklämmorna. Komponentens har tre olika sätt att anslutas mot nätet, beroende på konfiguration av maskinkomponentens neutralpunkt. Om isolerad neutralpunkt (*Isolated* i formuläret) väljs, ansluts de tre faser till *ABC*, se figur 4.5. Om neutralpunkten däremot är



Figur 4.5: Synkronmaskinkomponenten i PSCAD, konfigurerad som *Isolated*

framdragen till klämma (*Terminal* i formuläret), tillkommer en anslutning *N*. För det sista alternativet (*None* i formuläret) saknas neutralpunkten. I detta fall sker inkopplingen mot båda sidorna på statorn. Anslutningen av den andra sidan på statorlindningen sker då mot klämmorna med gemener. Figur 4.6 visar anslutningsklämmorna för dessa två senare fall. Då även fältlindningen har elektriska noder kan dessa anslutas till ett nät, exempelvis mot elektriskt uppbyggda matare.



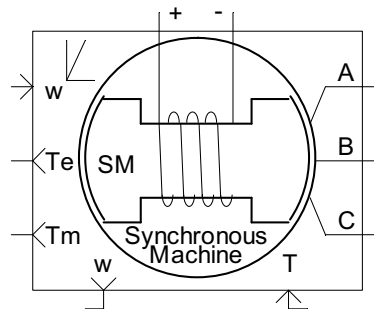
(a) Komponent med tre fasklämmor samt en neutralklämma, *Terminal*.

(b) Komponent med båda sidorna av statorlindningarna framdragen till klämma, *None*

Figur 4.6: Maskinmodellkomponenten med alternativa anslutningar.

Komponenten kan konfigureras dels för inre mekanisk dynamik, med ett internt tröghetsmoment (konfigureras som *Internal*), dels för rotorhastighetsstyrning. Vinkelhastigheten kan med hjälp av en flagga även fixeras vid initialhastigheten. Extern rotorstyrning av vinkelhastigheten medges (konfigureras som *External*) varför en extra ingång ω tillkommer för detta. Den är bara tillgänglig för denna konfigurering.

Övriga yttre signaler är momenten: T , T_m samt T_{el} . Figur 4.7 visar komponenten med isolerad neutralpunkt och externt styrd rotorhastighet. Ett användningsområde för externt styrd ro-



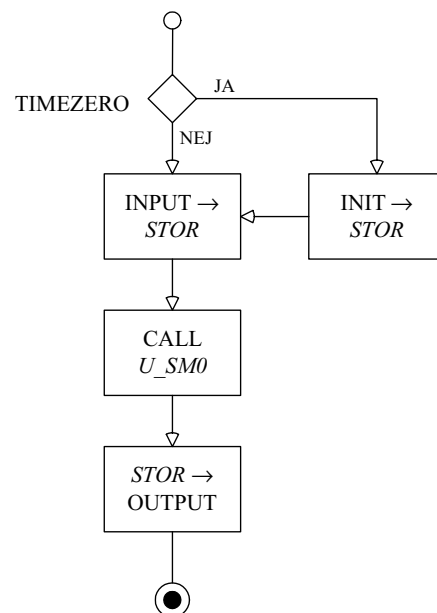
Figur 4.7: Komponenten med ingången ω , för externt styrd rotorhastighet, *External*.

torhastighet ligger inom flermassamodellering. Exempelvis kan system av flera massor påverka modellen. Komponenten är därför grafiskt och signalmässigt anpassad till befintlig flermassmodell. Hastighet och moment kan valbart konfigureras för faktiska eller normerade värden, för antingen motoriska eller generatoriska referenser.

Fortran-gränssnittet DSDYN

I *DSDYN* (user defined dynamics) är den användardefinierade programdelen som är kopplad till komponenten. Programkoden i *DSDYN* består i sin tur av två delar, dels i komponenten, dels externt i form av en Fortransubrutin. Programstrukturen för *DSDYN* framgår av figur 4.8.

Koden i komponenten hanterar alla externa noderna och formulären. Vid simuleringsstarten (*TIMEZERO*) sker initialiseringen, och alla konstanter och startvärden läses in i en global vektor *STOR*. Under inläsningen sker skalningar av spänningar och strömmar samt konvertering av angivna parametrar, från per unit till faktiska värden. Efter initialiseringen och för varje nytt tidssteg läses alla elektriska signaler och datasignaler. Detta följs av subrutinanropet. Sista momentet i *DSDYN* ger alla utsignaler samt injicerar resulterande ström.



Figur 4.8: Programstrukturen för programdelen *DSDYN*.

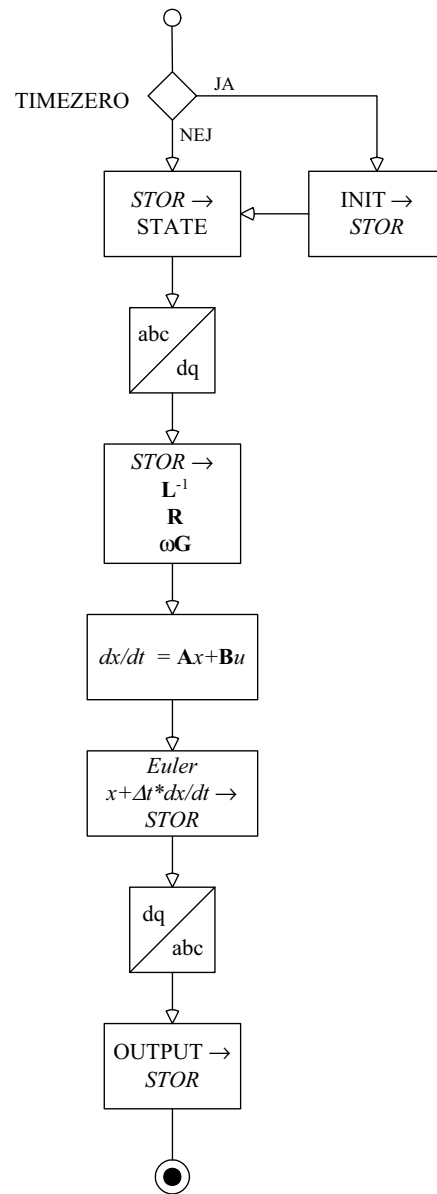
Subrutinen U_SM0

Programstrukturen för subrutinen U_SM0 framgår av figur 4.9. Subrutinen U_SM0 anropas via $DSDYN$ med en pekare till den globala vektorn $STOR$. På samma sätt som $DSDYN$ initialiseras först subrutinen. För vart nytt tidssteg hämtas sedan värden från $STOR$ och Parktransformeras till $dq0$ -planet. Induktans- och resistansmatriserna återdefinieras liksom tillståndsvektorn.

Till skillnad från i Simulink-modellen, används även i_0 som ett tillstånd och u_0 som en insignal, enligt ekvationerna 2.51 och 2.52. Detta leder till att Fortran-modellen bara verifieras mot Simulink-modellen för symmetriska fall.

Lösningen till tillstånden beräknas ur differentialekvationerna och integreras med *Euler framåt*, se ekvation 4.16. Tillstånden ger strömmarna, vilka transformeras tillbaka till abc -systemet samt läses in i vektorn $STOR$. Därefter sker ett återhopp till $DSDYN$.

$$y_{k+1} = y_k + \frac{dy_k}{dt} \Delta t \quad (4.16)$$



Figur 4.9: Programstrukturen för subrutinen U_SM0 .

4.2.4 Ickelinjär modell

Implementeringen av den ickelinjära modellen är integrerad och i huvudsak identisk med den linjära modellen. Modellen kan genom val simuleras med eller utan mättning.

Via en formulärsida matas en tomgångskurva in med upp till femton noder, se figur 4.10. I *DSDYN* sker under initialiseringen, inläsning och uppräknig av giltiga noder från tomgångskurvan.

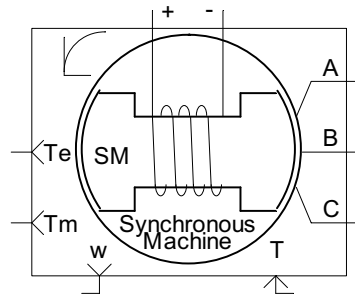
Label	Column 1	Column 2
B-H curve through [0,0].	0	0.0 [p.u.]
First point must be at the unsaturated part.	0.2	0.218181818 [p.u.]
Only monotonically increasing data.	.38	0.390909091 [p.u.]
Current (1st column) in an arbitrary unit and voltage (2nd column) in per unit.	.60	0.545454545 [p.u.]
Current (1st column) in an arbitrary unit and voltage (2nd column) in per unit.	.8	0.645454545 [p.u.]
Current (1st column) in an arbitrary unit and voltage (2nd column) in per unit.	1.	0.718181818 [p.u.]
Current (1st column) in an arbitrary unit and voltage (2nd column) in per unit.	1.5	0.827272727 [p.u.]
Current (1st column) in an arbitrary unit and voltage (2nd column) in per unit.	2.0	0.9 [p.u.]
Current (1st column) in an arbitrary unit and voltage (2nd column) in per unit.	2.5	0.936363636 [p.u.]
Current (1st column) in an arbitrary unit and voltage (2nd column) in per unit.	3.0	0.954545454 [p.u.]
Less than fifteen nodes, end with zeros [0,0] (or non monotonic data).	0	0 [p.u.]
	0	0 [p.u.]
	0	0 [p.u.]
	0	0 [p.u.]
	0	0 [p.u.]
	0	0 [p.u.]

Figur 4.10: Formulärsidan för inmatning av tomgångskurvan. Alla monotont ökande noder läses in och interpoleras.

Grafiskt indikeras mättningen genom, att symbolen uppe till vänster i figur 4.11 växlar från en linjär tomgångskurva till en mättad tomgångskurva. Som jämförelse visas i figurerna 4.5 och 4.6 den linjära symbolen.

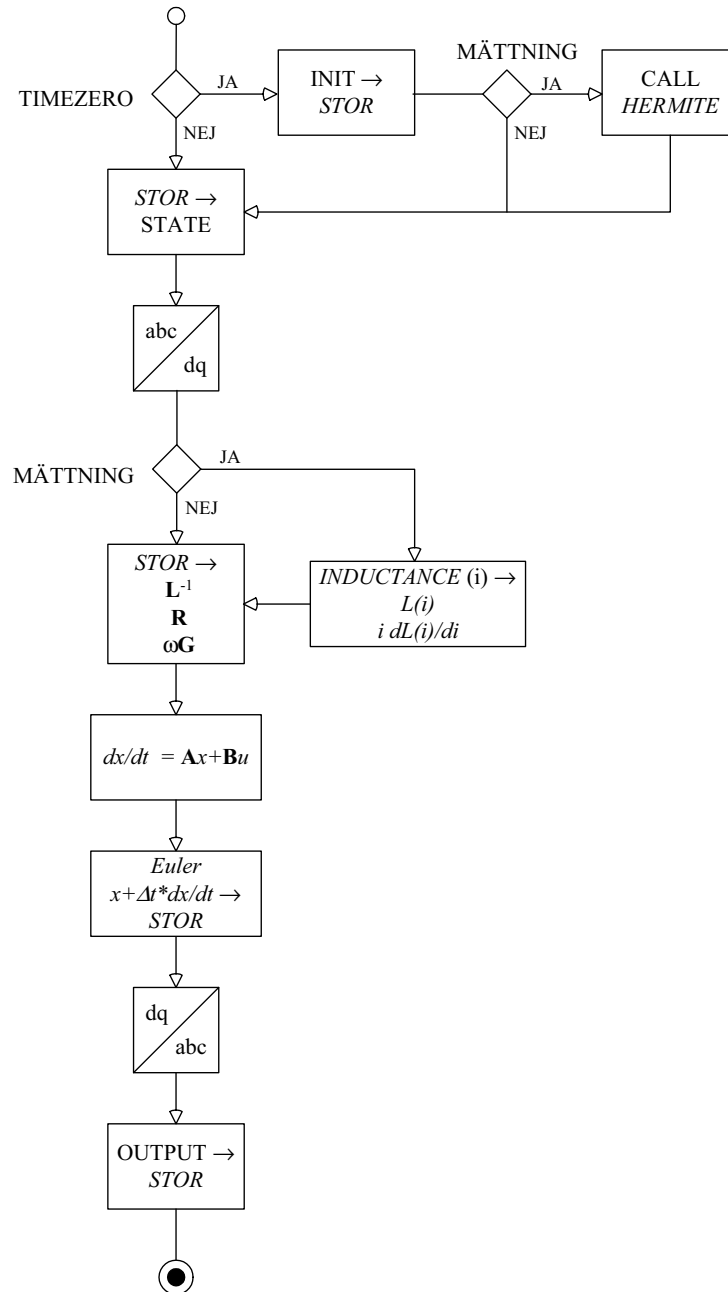
Programstrukturen i *DSDYN* skiljer sig inte från den linjära modellen, se figur 4.8. Mer omfattande tillägg berör istället subrutinen U_SM0 . I figur 4.12 visas programsekvensen för den mättade modellen U_SM0 . Det som tillkommit från den linjära modellen är dels koefficientberäkningen i subrutinen *Hermite*, dels anropet till funktionen *Inductance*. Beräkningen av interpoleringskoefficienterna sker här under initialiseringen, medan beräkning av den strömberoende magnetiseringsinduktansen i *Inductance* sker för varje tidsteg.

Programstrukturerna för subrutinen *Hermite* visas i figur 4.13. Mättningskurvan hämtas från *STOR*-vektorn för normalisering av strömaxeln. Därefter sker beräkning och uppskattning av derivatorna i respektive nod. Koefficienterna löses ut och sparas i *STORF*-vektorn. Notera att *STOR* inte är samma vektor som *STORF*.

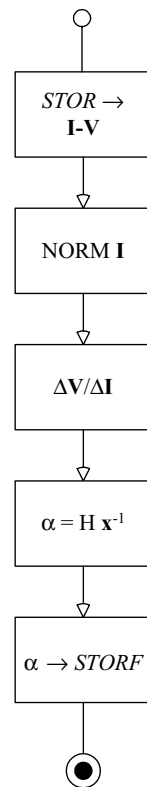


Figur 4.11: Den grafiska komponenten i EMTDC med symbol för mättnig.

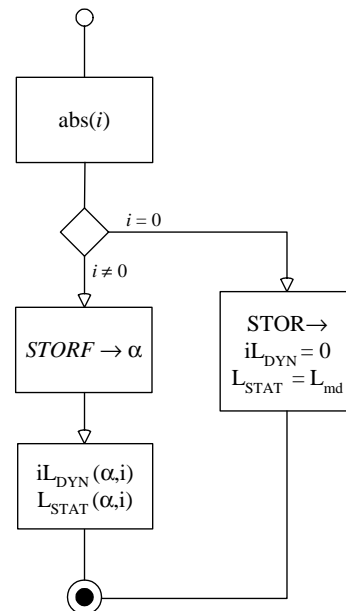
Funktionen *Inductance* anropas med strömmen som inparameter. Om $i \neq 0$ maskas koefficienterna till rätt intervall fram. Den strömberoende induktansen och dess derivata beräknas och returneras. Om $i = 0$ sätts induktansen till maskinen magnetiseringsinduktans, $L(i) = L_{md}$, och derivatan av induktansen sätts till noll. Programstrukturen för funktionen visas i figur 4.14.



Figur 4.12: Programstrukturen för den mättade modellens subrutin U_SM0 .



Figur 4.13: HERMITE:
Programstruktur för beräkning av Hermitekoefficienterna för kurvinterpolering.



Figur 4.14: INDUCTANCE:
Programstruktur för beräkning av den strömberoende induktansen.

4.3 Jämförelse mot befintlig modell (Manitoba-modellen)

Vid implementeringen av den nya modellen i EMTDC har bl.a. utseende på användargränssnittet anpassats, så att användare av den befintliga EMTDC-modellen lättare känner igen sig. Andra likheter mellan dessa modeller rör den grafiska komponenten och dess anslutningar mot dels nätmodellen, dels multi mass-modellen.

För att särskilja modellerna i EMTDC, kallas den befintliga modellen för *Manitoba-modellen*³ och den egenutvecklade modellen kallas för *NEFI-modellen*, Neutral and Electrical Field winding Interface.

Detaljerna under Manitoba-modellens skal är inte helt kända. Dock framgår vissa skillnader tydligt. Referensriktningarna i Manitoba-modellen följer generatoriska referenser medan NEFI-modellen istället följer motoriska referenser. Skillnader finns även i tillståndsmodellen. NEFI-modellen använder absoluta storheter till skillnad från Manitoba-modellens storheter i per unit. Externt kan dock NEFI-modellen valfritt anpassas till både generatoriska referenser och normerade storheter.

En annan skillnad gäller val av interpoleringsmetoder. Här använder Manitoba-modellen en linjär metod medan NEFI-modellen använder en kubisk metod. Förutom att NEFI-modellen tar fler punkter på tomgångskurvan sker inmatningen på samma sätt med samma randvillkor, monotont ökande noder.

Likheter i konfigureringen av modellerna finns. Val av en eller två dämplindningar i q -led sker via en flagga i båda modellerna. I NEFI-modellen görs detta på grund av att olika tillståndsmodeller används för respektive fall. Troligen sker detta i Manitoba-modellen också. På samma sätt väljs även mättningsberoendet för magnetiseringsinduktansen i d -led.

Integreringen av tillståndsmodellen sker med hjälp av samma metod, Euler framåt, och att dömna av Manitoba-modellens STOR-vektor är troligen tillstånden de samma. I båda modellerna tillåts tillstånd/storheter att monitoreras från STOR-vektorn.

När det gäller impedansjordning av modellerna är implementeringarna olika. I Manitoba-modellen ligger den internt och en isolerad mittpunkt väljs helt enkelt med en hög serieimpedans. I NEFI-modellen sker däremot impedansjordningen externt. Isolerad mittpunkt kan istället konfigureras med hjälp av en flagga. Y-kopplingen saknar här koppling mot jord. På detta sätt, med extern elektrisk neutralkrets, kan NEFI-modellen erbjuda andra användbara kopplingsmöjligheter.

4.4 Sammanfattning

Två modeller är implementerade. Dels en enkel, linjär modell i Simulink, dels en skarp version i EMTDC. Modellen i Simulink är implementerad som en S-funktion och helt utan valmöjligheter för olika antal dämplindningar eller mättning. Modellen saknar även nollföljds-krets (dq ej $dq0$ -transformering). I Simulink ges den matande spänningen, fältspänningen och momentet som insignaler.

³Namnet är egenhändigt valt efter företaget som implementerat modellen. Namnet förekommer endast i denna rapport.

Modellen i EMTDC består av tre delar: Ett grafiskt gränssnitt, ett Fortrangränssnitt och Fortrankoden. Det grafiska gränssnittet består dels av själva komponenten med anslutningar, dels av maskinens parameterformulär. Fortrangränssnittet länkar anslutningar och signaler till och från Fortrankoden, själva modellen. Gränssnitten ligger i PSCAD och programkoden ingår i EMTDC.

Fortrankoden är skriven i Fortran 90 men med mindre anpassningar troligen körbar som Fortran 77. Globala vektorer används för att lagra modellens tillstånd, parametrar och signaler. Vektorn går även att monitorera för såväl konstanta som dynamiska värden.

Komponenten kan matas med trefas på olika sätt: Antingen som kortsluten med isolerad neutralpunkt, eller med neutralpunkten framdragen till klämma. Spänningen kan även läggas över respektive statorlindning. Fältlindningen matas med likspänning. Överreduceringen av fältlindningen till statorlindningen medför att spänningen som läggs på fältlindningen är motsvarande lindningsomsättningen större. Som en följd av detta ger komponenten externt även motsvarande lindningsomsättningen lägre ström.

Modellen konfigureras som antingen linjär eller ickelinjär, med avseende på magnetiseringsinduktansens mättning, i komponenten. Vid mättning matas tomgångskurvan in med spänning/flödet i per unit medan strömmen kan ges i valfri enhet. Subrutinen HERMITE interpolerar tomgångskurvan och funktionen INDUCTANCE ger graden av mättning i form av en statisk och en dynamisk induktans.

Beroende på konfigurering förändras komponenten grafiskt så att motsvarande anslutningar blir tillgängliga. Genom val kan in- och utsignaler fås i antingen faktiska enheter eller i per unit. Det är även valbart hurvida komponenten externt ska hanteras med motoriska eller generatoriska referenser. Komponentens passar grafiskt och signalmässigt mot befintlig flermassamodell.

Kapitel 5

Simuleringar

För att verifiera överensstämmelsen av NEFI-modellens implementering genomförs simuleringar i olika fall. Modellen som helhet såväl som enskilda delar verifieras. Den befintliga modellen i EMTDC, Manitoba-modellen utgör referensmodell men även modellen i Simulink ingår som referens. Verifieringar mot modellen som bygger på S-funktionen sker framförallt för att verifiera modellöversättningen till Fortrankod.

Med *Simulink* eller *Simulink-modellen* avses modellen med S-funktionen. För att särskilja modellerna i EMTDC, kallas den befintliga modellen för *Manitoba-modellen* och den egenutvecklade modellen kallas *NEFI-modellen*. Aktuella subrutiner som relaterar till respektive modell i EMTDC är *NEWSCN* och *U_SM0*.

5.1 Verifieringsmetoder

Modellerna konfigureras och simuleras som motor i den meningen att modellen driver motoriskt positiv last. Det anslutna nätet är i möjligaste mån ett starkt nät, vilket innebär inga eller mycket låga nätimpedanser. Den linjära NEFI-modellen verifieras för följande fall:

- Stationärtillstånd i tomgång
- Stationärtillstånd vid märkmoment
- Momentsteg
- Momentsteg med dubbla dämpblindningar i q -led
- Momentsteg med obalans i spänningsmatningen
- Momentsteg med extern massmodell

Den icke linjära NEFI-modellen verifieras för följande fall:

- Stationärtillstånd i tomgång
- Stationärtillstånd vid märkmoment
- Momentsteg

Verifieringen av modellen presenterar dels mätresultatet, dels graden av överensstämmelse mot befintlig Manitoba-modell. I stationäranalysen jämförs dock båda modellerna mot Simulink-modellen. Simuleringarna sammanställs i MATLAB. Mätningarna presenteras i huvudsak i per unit, liksom avvikelserna mellan modellerna. Undantaget gäller lastvinkeln, vilken mäts i grader.

5.1.1 Stationäranalys

I det stationära fallet jämförs de teoretiska värdena med de, för tomgång och märklast, simulerade värdena. När respektive modell når stationärtillstånd genomförs avläsningen av de utvalda parametrarna. För tomgångssimuleringen är kravet att stator- eller dämpströmmarna är lika med noll samt att spänningen i d -led skall vara lika med noll, se ekvationerna 2.41 – 2.42.

Fältspänningarna, som kommer att användas i dessa simuleringar, är avstämde för respektive tomgång och märkmoment. För märkmoment itereras värdet på fältspänningen. Som referens väljs här Simulink-modellen. Med en fältström som för märkmoment och märkspänning som ger $\cos \varphi = 1.0$, fås aktuell fältspänning. Fältspänningen under dessa förutsättningar benämns u_{fN} och förhåller sig till u_{f0} enligt tabell 5.1.

u_{f0}, i_{f0}	1.0	[p.u.]
u_{fN}, i_{fN}	1.262179726	[p.u.]

Tabell 5.1: Definitionerna på fältspänningen för den linjära modellen, vid tomgång respektive märklast.

Simuleringarna sker vid statorns märkspänning. Matande spänningar och eventuella moment, är satta med minst tio siffrors noggrannhet. Detta gäller även för parametervärdena, då dessa anges på olika form för Simulink respektive EMTDC.

Respektive modell når stationärtillstånd inom tio sekunders simulering. För modellen i Simulink används fasta tidssteg om $\Delta t = 200 \mu s$ med *ODE1 Euler* som solver. För simuleringarna i PSCAD/EMTDC kommer ett tidssteg på $\Delta t = 50 \mu s$ att användas. Plotstegen $\Delta t = 200 \mu s$ är samma som för simuleringarna i Simulink. Steglängden är vald med hänsyn till simuleringstid och plotfilens storlek.

5.1.2 Momentsteg

Med ett $\cos \varphi = 1.0$ skall det varken genereras eller konsumeras någon reaktiv effekt. Som en följd av detta kommer därför märkeffekten uppnås vid märkmoment, se bilaga D.

För att jämföra modellerna kommer avvikelserna från de teoretiska värdena att beräknas utifrån uppmätta strömmar och spänningar. Det kommer att omfatta följande storheter: Det elektriska momentet, den reaktiva effekten samt den mekaniska effekten, enligt ekvationerna 2.43, 2.47 och 2.48a.

De enskilda värdena på strömmar respektive spänningar kommer alltså inte att jämföras utan endast sammansatt i form effekter och moment. Det elektriska momentet väljs för att indikera

överensstämmelsen av strömmarna. Spänningarna finns dels med i den reaktiva effekten genom ekvation 2.47, dels genom att välja ekvation 2.48a framför 2.48b, vid beräkningen av den mekaniska effekten.

Simuleringen startas från en *snap shot*-fil där modellerna nått stationärtillstånd i tomgång. Vid tiden t_0 ges ett momentsteg enligt tabell 5.2. Momentsteget, liksom matande spänningar,

$t > t_0$	$T = 0$
$t \leq t_0$	$T = T_N$

Tabell 5.2: Momentsteget vid tidpunkten t_0 .

är satta med tio siffrors noggrannhet. Steget ligger på under hela mätperioden, under tiden som modellen når ett nytt stationärt läge. Simuleringarna sker vid märkspänning, om inget annat anges.

5.2 Linjär modell med enkla dämpindningar

Syftet med denna simulering är att verifiera implementeringen av NEFI-modellen dels för att säkerställa kodöverflyttningen från Simulink till Fortran, dels för att verifiera tillståndsmo-
dellen mot Manitoba-modellen. Verifieringen omfattar dels en analys av stationärtillstånd, dels ett momentsteg.

5.2.1 Uppkoppling

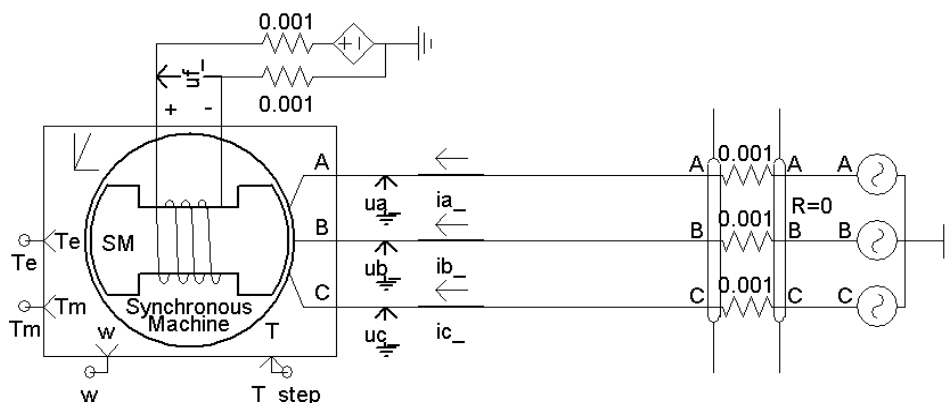
Figur 5.1 visar uppkopplingen av NEFI-modellen i PSCAD. En ideal trefasig och jordad spänningskälla matar modellen. Fältspänningen matas separat från en jordad ideal likspänningskälla. Fasström och fasspänning mäts på anslutningen (klämmorna) till modellen. I fältkretsen mäts ström och spänning på fältlindningsklämmorna.

I Manitoba-modellen är fältspänningen en ren signal. På grund av skillnader mellan modellerna sker därför fältmatningen i huvudsak internt i NEFI-modellen. Övriga signaler monitoreras internt i respektive modell.

Verifieringen sker i ett styvt nät där nätimpedanserna uppgår till i storleksordningen $m\Omega$ ¹. I de symmetriska simuleringarna är den Y-kopplade statorlindningen isolerad (NEFI-modellen konfigurerad *Isolated*). För Manitoba-modellen motsvaras detta av en impedansjordning på 100 k Ω .

Manitoba-modellen simulerar järnförlusterna i form av en ekvivalent shuntresistans. I och med att NEFI-modellen saknar motsvarande sätts därför resistansen i Manitoba-modellen till 100 k Ω för att minimera dess inverkan.

¹I EMTDC är det nödvändig att mäta effekt i nätet över en (liten) impedans



Figur 5.1: Bild över uppkopplingen av NEFI-modellen i EMTDC.

Momentsteget appliceras med en stegfunktionen, utförd som en enkel EMTDC-komponent. Den styrs med fyra parameterar: Tidpunkten för steget, steglängden, amplituden före steget samt amplituden efter steget.

5.2.2 Maskin- och systemparametrar

Maskinparametrarna är specificerade i bilaga D. Maskinens märkdata väljs som systembas, se bilaga C.

5.2.3 Stationära tillstånd

De tre modellerna, Simulink, NEFI och Manitoba, jämförs i stationärtillstånd mot de teoretiska värden som ges vid respektive tomgång och märkmoment.

Simulering i tomgång

I tabell 5.3 redovisas resultatet i tomgång för u_{f0} . Resultatet presenteras, för respektive modell, som avvikelser från det teoretiska värdet. Resultatet ska ses som toppvärdet av absolutbeloppet, under flera perioder, efter det att stationärtillstånd uppnåtts. Detta för att fånga den absoluta avvikelserna hos växelstorheterna och även för de storheter, vilka kan oscillera (mycket) svagt i stationärtillstånd.

Avvikelsen mellan Simulink och NEFI ligger inom en tiopotens, för i storleksordningen 10^{-9} p.u. Avvikelsen i EMTDC beror här av skillnaden i nätets styvhet. Överensstämmelsen mellan Manitoba och NEFI är i paritet med varandra, så när som på fasströmmarna i_{abc} . Trots den mycket låga interna strömmen i Manitoba-modellen, går det en fasström på någon hundradel per unit. I och med att det är en amplitudinvariant transformation, skall inte den inre modellens strömbidrag vara större än i samma storleksordning som statorströmmen (beloppet av i_d och i_q).

Storhet	Teoretiskt	Avvikelser		
		Simulink	NEFI	Manitoba
u_q	$\sqrt{2}$	2.8E-14	1.5E-9	1.6E-8
u_d	0.0	2.4E-12	1.1E-10	1.1E-9
i_d	0.0	6.0E-12	2.0E-9	2.0E-8
i_q	0.0	3.6E-12	1.0E-12	2.2E-12
i_a	0.0	3.0E-12	2.0E-9	1.3E-2

Tabell 5.3: Mätresultat vid stationärtillstånd och tomgång för $u_{f0} = 1.0$ p.u. I kolumn 3–5 redovisas avvikelsen från det teoretiska värdet för respektive modell. Alla tabellvärden ges i per unit.

En förklaring till avvikelsen är Manitoba-modellens terminering vid anslutningsklämmorna. Termineringen ska inte avsiktligt påverka modellen, utan är till för att EMTDC-nätet ska känna av modellen vid transienter. Den kommer dock att ge mätbara felströmmar på grund av dess utformning, se vidare under bilaga E. I NEFI-modellen saknas motsvarande terminering helt.

Simulering vid märkmoment

Här används fältspänningen u_{fN} och $\cos\varphi = 1.0$ vid märkmoment. I tabell 5.4 presenteras mätresultatet som avvikelsen från det teoretiska värdet. Mätresultatet visar de beräknade mo-

Storhet	Teoretiskt	Avvikelser		
		Simulink	NEFI	Manitoba
T_{el}	1.0	9.1E-11	5.0E-11	2.3E-10
P_m	1.0	1.0E-10	5.0E-11	-4.2E-11
Q_m	0.0	4.4E-11	2.6E-5	2.6E-6

Tabell 5.4: Mätresultat vid stationärtillstånd och T_N för $\cos\varphi = 1.0$. I kolumn 3–5 visas respektive modells avvikelse från det teoretiska värdet. Alla tabellvärden ges i per unit.

mentet och effekterna. För EMTDC-simuleringarna är de inte uppmätta i nätuppkopplingen, utan baseras på modellernas inre strömmar och spänningar. Avvikelserna ligger väl samlade, med undantag av den reaktiva effekten. I och med att modellerna i EMTDC avviker på likartat sätt orsakas detta troligen av skillnaden i det matande nätet.

5.2.4 Momentsteg

I denna simulering jämförs NEFI-modellen mot Manitoba-modellen. NEFI-modellen jämförs även med extern (spänning) respektive intern (signal) matning till fältlindningen. Följande

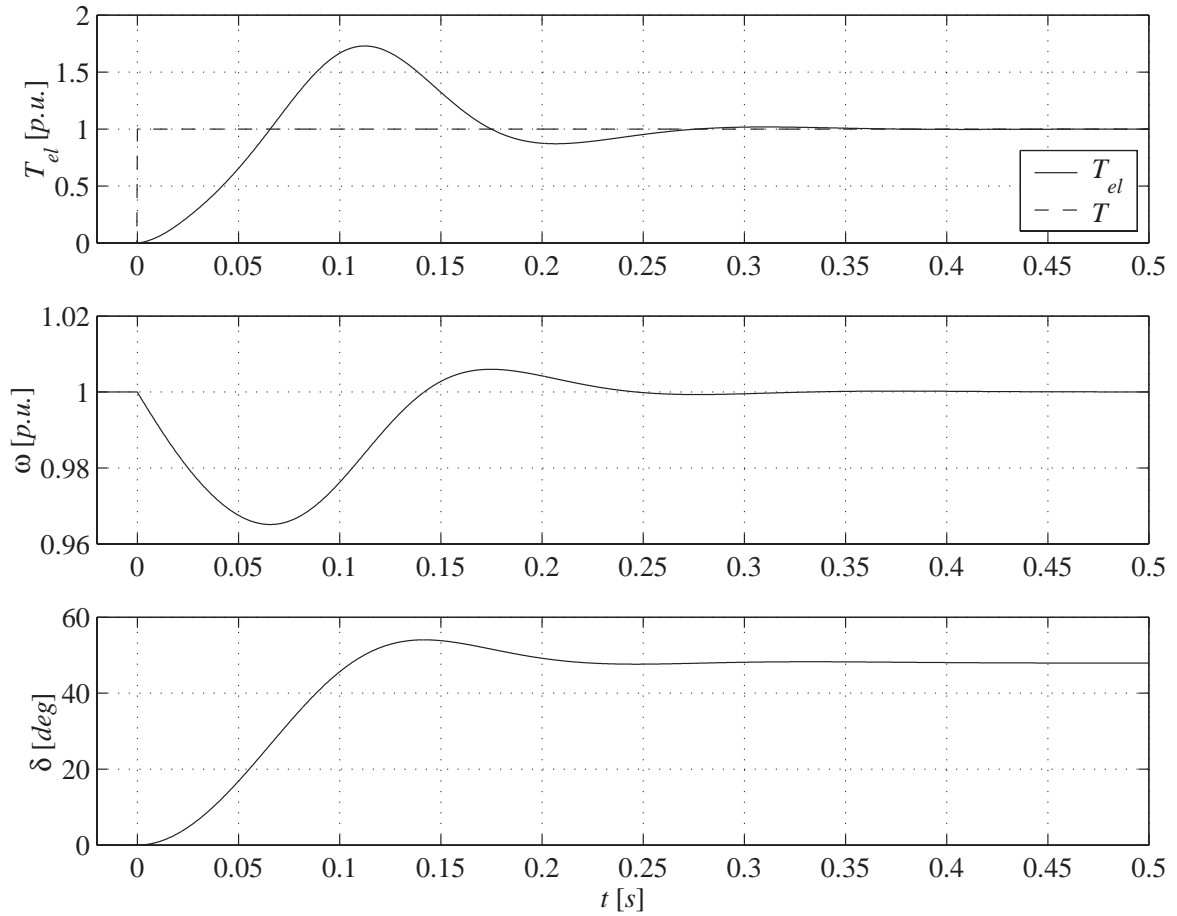
storheter verifieras:

- Det elektriska momentet T_{el}
- Den mekaniska vinkelhastigheten ω
- Lastvinkeln δ
- De interna strömmarna i_d , i_q och i_f
- Den externa fasströmmen i_a

Den interna spänningen u_s verifieras genom den uppmätta lastvinkeln δ , inte komponentvis som för statorströmmarna.

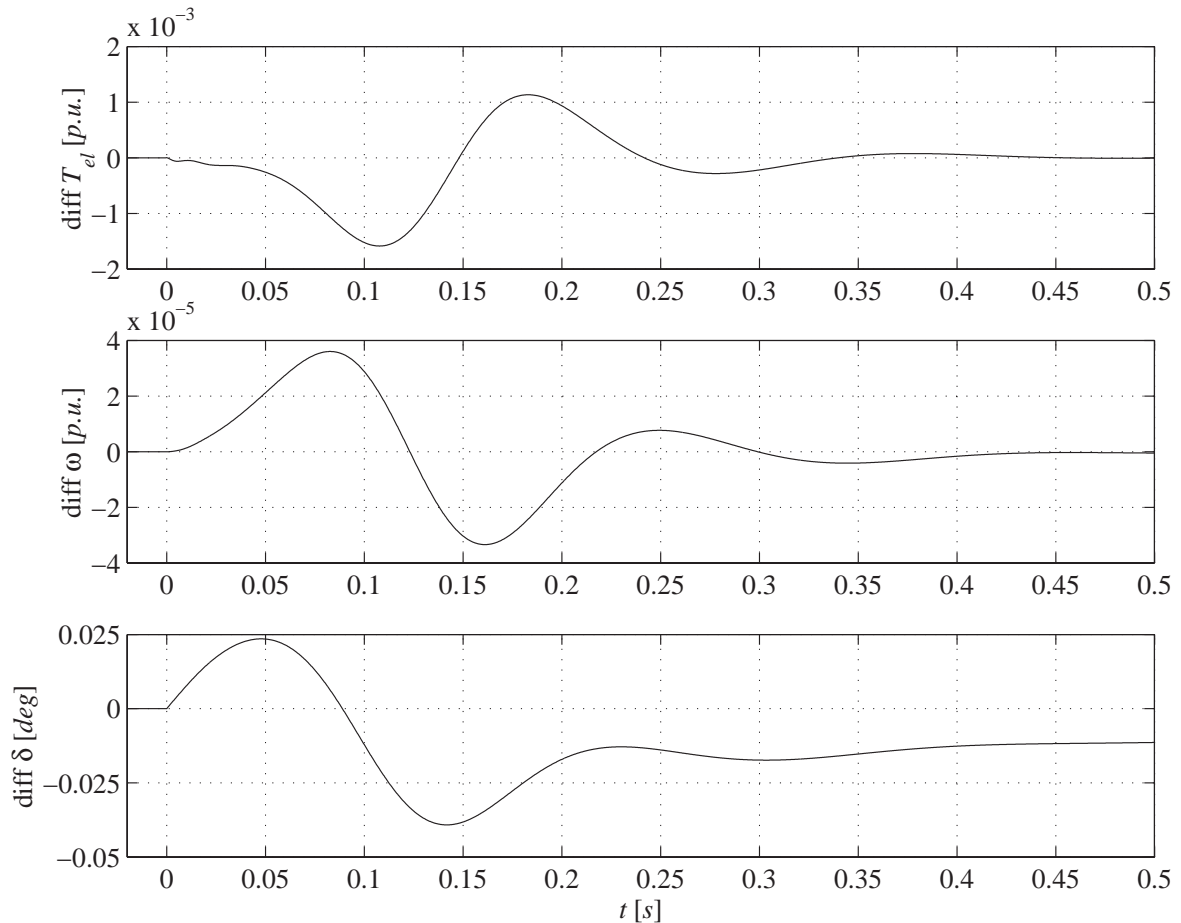
Resultat momentsteg

Resultaten av momentsteget visas från steget vid tiden t_0 till stationärtillstånd, enligt figur 5.2. Momentsteget bromsar maskinen något, under tiden lastvinkel ökar. Insvängningen sker under några tiondels sekunder, då maskinen åter når stationärtillstånd. Fältspänningen u_{f0} hålls konstant under hela steget. För $t < 0$ är maskinen i tomgång men vid stationärtillstånd efter steget ligger maskinen inte på $\cos \varphi = 1.0$.



Figur 5.2: Kurvorna visar de linjära modellernas stegsvar, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Det elektriska momentet T_{el} . *Mellan:* Den mekaniska vinkelhastigheten ω . *Nederst:* Lastvinkel δ .

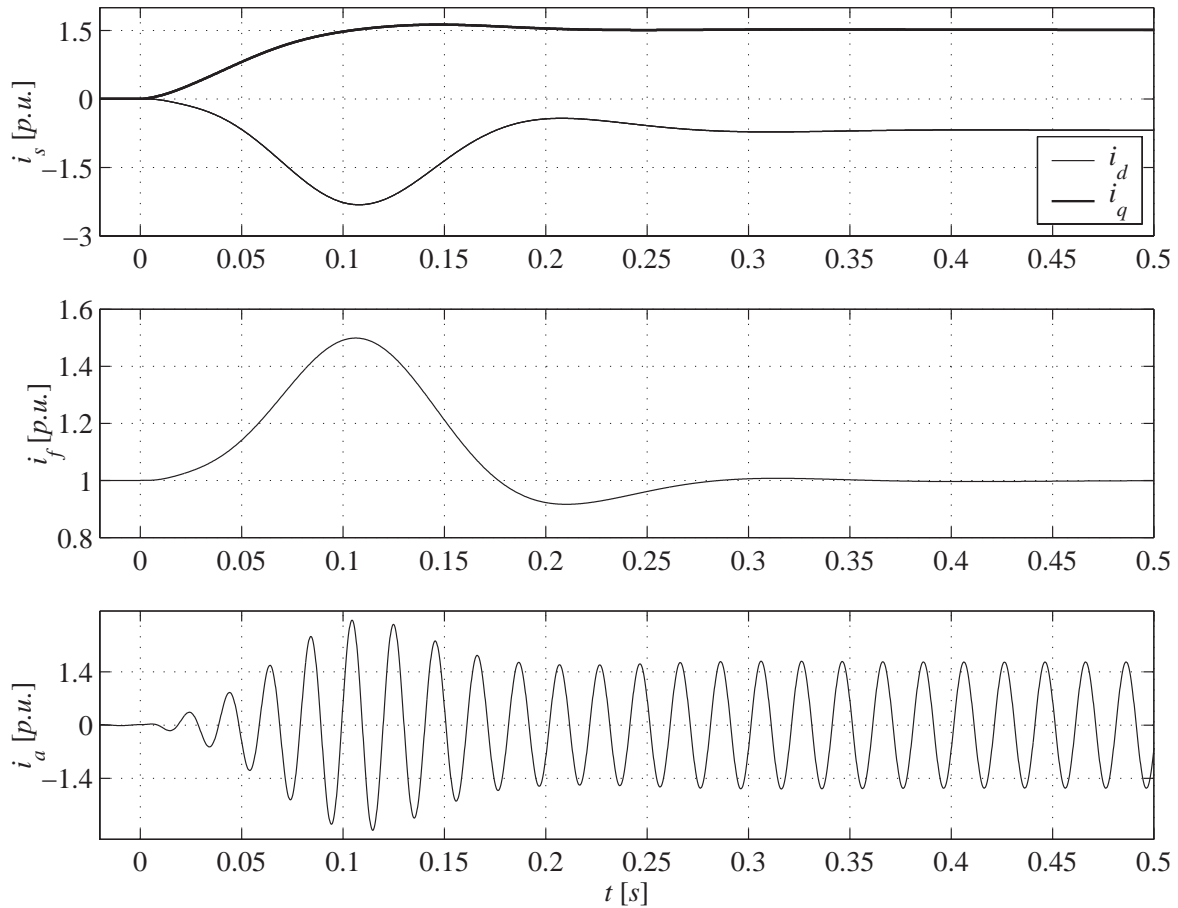
Avvikelsen mellan Manitoba-modellen och NEFI-modellen presenteras i figur 5.3. Manitoba-modellen har en snabbare förändring av hastigheten och lastvinkeln än NEFI-modellen. Där-
 emot svarar NEFI-modellen något snabbare med det elektriska momentet. Svängningarna stabiliseras och modellerna synkroniseras och hamnar i fas med varandra.



Figur 5.3: Differansen mellan de linjära Manitoba- och NEFI-modellerna, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . Överst: Det elektriska momentet T_{el} . Mellan: Den mekaniska vinkelhastigheten ω . Nederst: Lastvinkel δ .

Momentsteget utvecklar en påtaglig lastvinkelförändring men ger dock endast en moderat avvikelse från Manitoba-modellen. Dock ses här en kvarvarande avvikelse där NEFI-modellen har en något större lastvinkel. Detta kan troligen förklaras av att Manitoba-modellen producerar reaktiv effekt, vilket spänningshöjer något vid klämmorna på modellen, se fasströmdifferansen i figur 5.5.

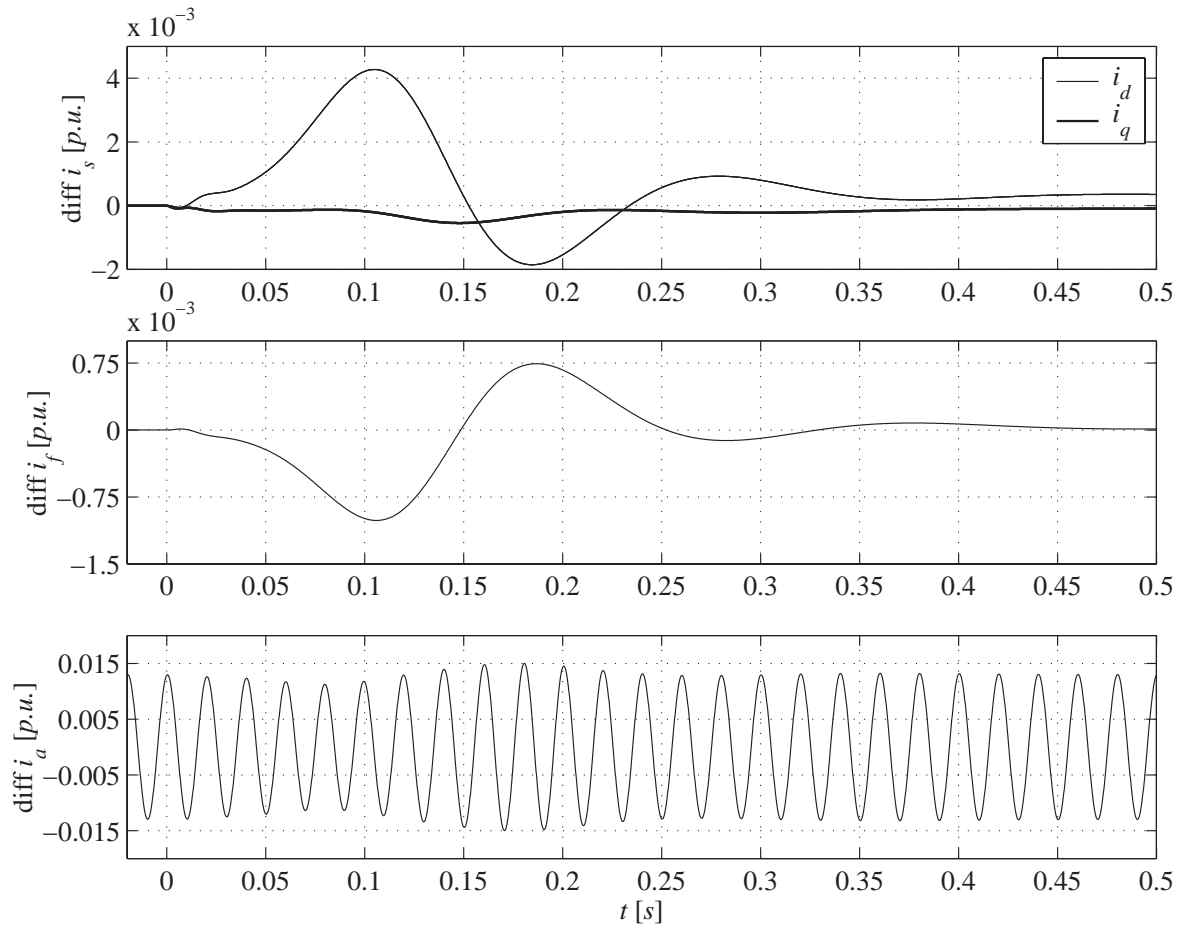
Strömsvaren visas i figur 5.4. För fasströmmen i_a ökar amplituden och RMS-värdet när strax över en per unit, ett toppvärde på drygt $\sqrt{2}$. Notera att märklast, $T_m = 1.0 \text{ p.u.}$, ger en fasström över en per unit, se definitionen i bilaga C.



Figur 5.4: Kurvorna visar de linjära modellernas svar, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Statorströmmarna i_d och i_q . *Mellan:* Fältströmmen i_f . *Nederst:* Fasströmmen i_a .

Den normerande basen för fältströmmen i_f är inte densamma som för de övriga strömmarna. Som normerande ström i fältkretsen används i stället den ström som spänningen u_{f0} ger vid tomgång, se ekvation 2.40.

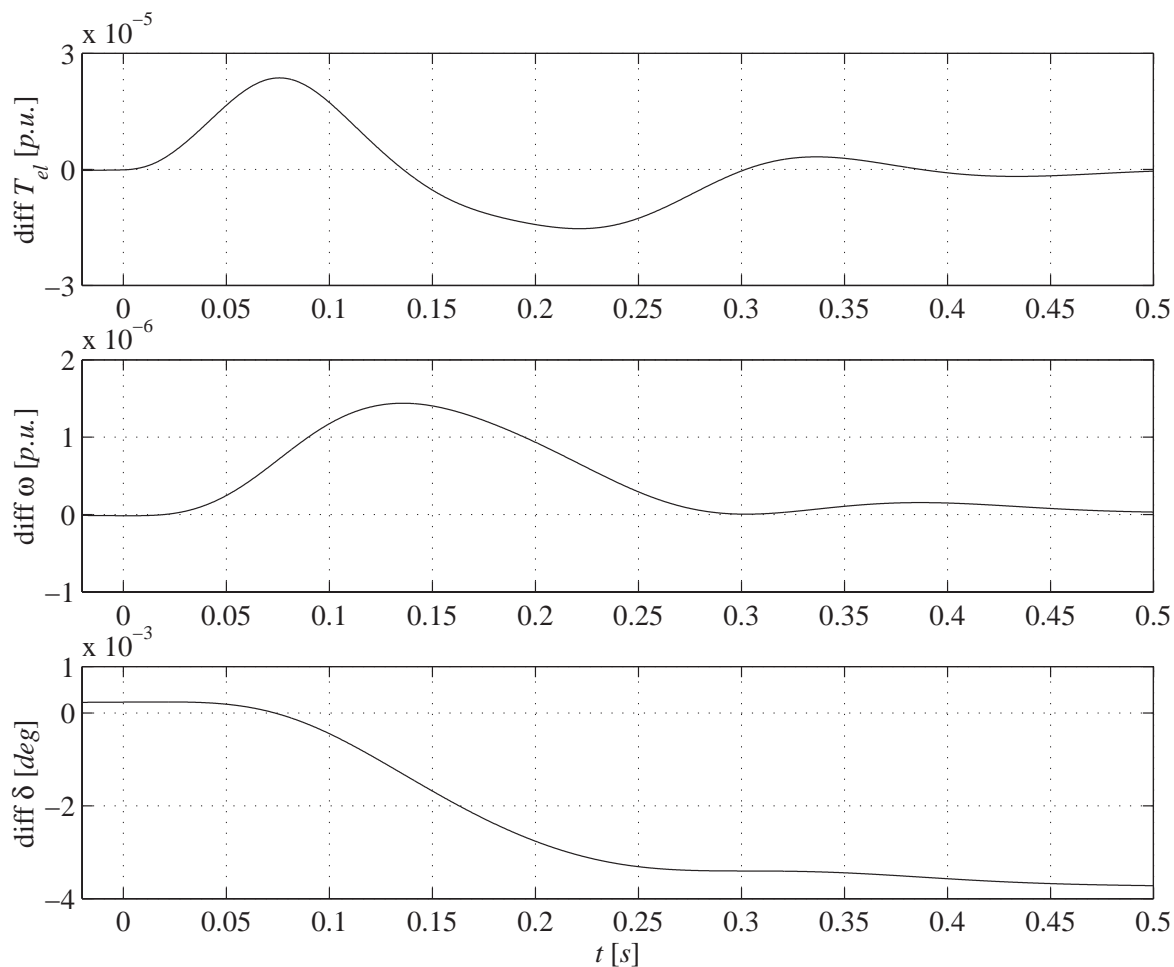
Avvikelsen av strömmarna presenteras i figur 5.5. Differansen för statorströmmarna och fältströmmen konvergerar mot noll eller nära noll. De maximala avvikelserna ligger i detta fall, kring tusendels per unit. Fasströmmen har även här ett bestående fel, både innan och efter steget. Motsvarande fel finns uppmätt i de stationära simuleringarna, se avsnitt 5.2.3.



Figur 5.5: Skillnaden mellan de linjära Manitoba- och NEFI-modellerna, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Strömmen i_s , med vardera komponent. *Mellan:* Fältström i_f . *Nederst:* Fasströmmen i_a .

Resultat momentsteg med intern respektive extern fältmatning

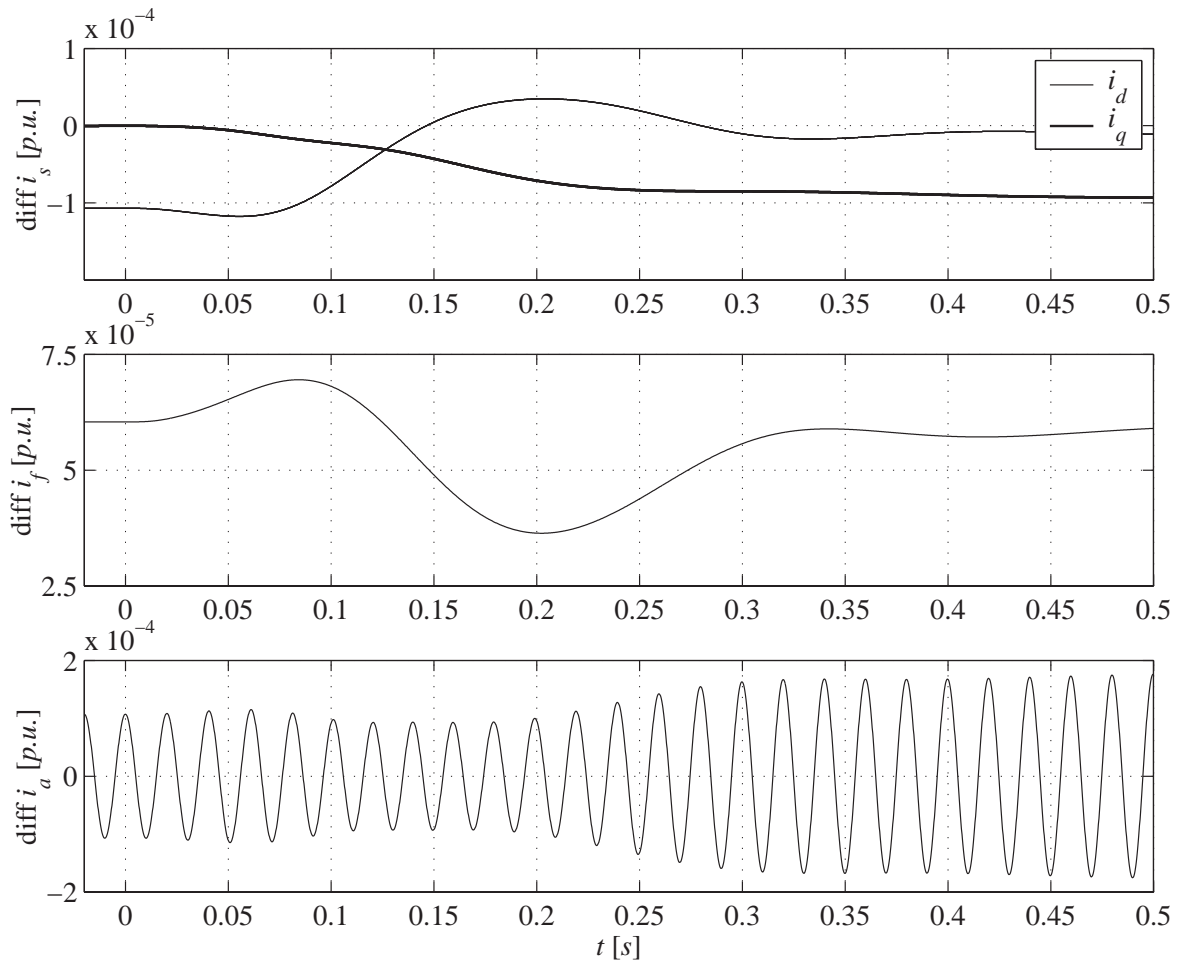
I figur 5.6 visas resultaten av jämförelsen mellan intern respektive extern fältmatning, hos NEFI-modellen. För intern matning ges fältspänningen som en konstant, likt tidigare simuleringar, och för extern matning matas fältlindningen av en spänningskälla. Skillnaderna är mindre än en tiondel av motsvarande resultat i jämförelsen mellan Manitoba-modellen och NEFI-modellen. Vid extern matning ger fältströmmen och nätimpedansen upphov till ett



Figur 5.6: Differansen mellan intern respektive extern fältspänningsmatning, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Det elektriska momentet T_{el} . *Mellan:* Den mekaniska vinkelhastigheten ω . *Nederst:* Lastvinkel δ .

spänningsfall över fältlindningen. I och med att fältlindningen är överreducerad till statorsidan, se bilaga D, och att matarkretsens impedans, se figur 5.1, ger det ett spänningsfall på i storleksordningen mV . Avvikelsen i fältström ligger därför i paritet med vad som är förväntat.

Figur 5.7 visar att steget ger upphov till, att fältströmsdifferensen mellan intern och extern matning inte är konstant. Detta visar att fältlindningen har en återkoppling då matande spänning även beror av strömmen vid fältlindningsklämmorna. En fungerande återkoppling samt avvikelens storlek ger att implementeringen av det elektriska gränssnittet fungerar.



Figur 5.7: Skillnaden i strömmarna vid ett momentsteg med intern respektive extern fältspänningsmatning. *Överst:* Strömmen i_s , med vardera komponent. *Mellan:* Den interna fältströmmen i_f . *Nederst:* Fasströmmen i_a .

5.3 Linjär modell med dubbla dämpindningar i q -led

Avsikten med denna simulering är att verifiera implementeringen av den andra dämpindningen i q -led. Denna verifiering utförs genom att jämföra stegsvaret hos Manitoba-modellen och NEFI-modellen för ett momentsteg, enligt avsnitt 5.1.2.

5.3.1 Uppkoppling

Uppkopplingen är densamma som i avsnitt 5.2.1.

5.3.2 Maskin- och systemparametrar

Vid en modellkonfiguration med dubbla dämpindningar i q -led används maskindata enligt bilaga D, med tillägg av tabell 5.5. Maskinens märkdata väljs som systembas, se bilaga C.

$L_{Q_1\sigma}$	=	$L_{Q\sigma}$
$L_{Q_2\sigma}$	=	$L_{Q\sigma}$
R_{Q_1}	=	R_Q
R_{Q_2}	=	R_Q

Tabell 5.5: Tillägg av maskinparametrar för användning i simuleringarna med dubbla dämpindningar i q -led.

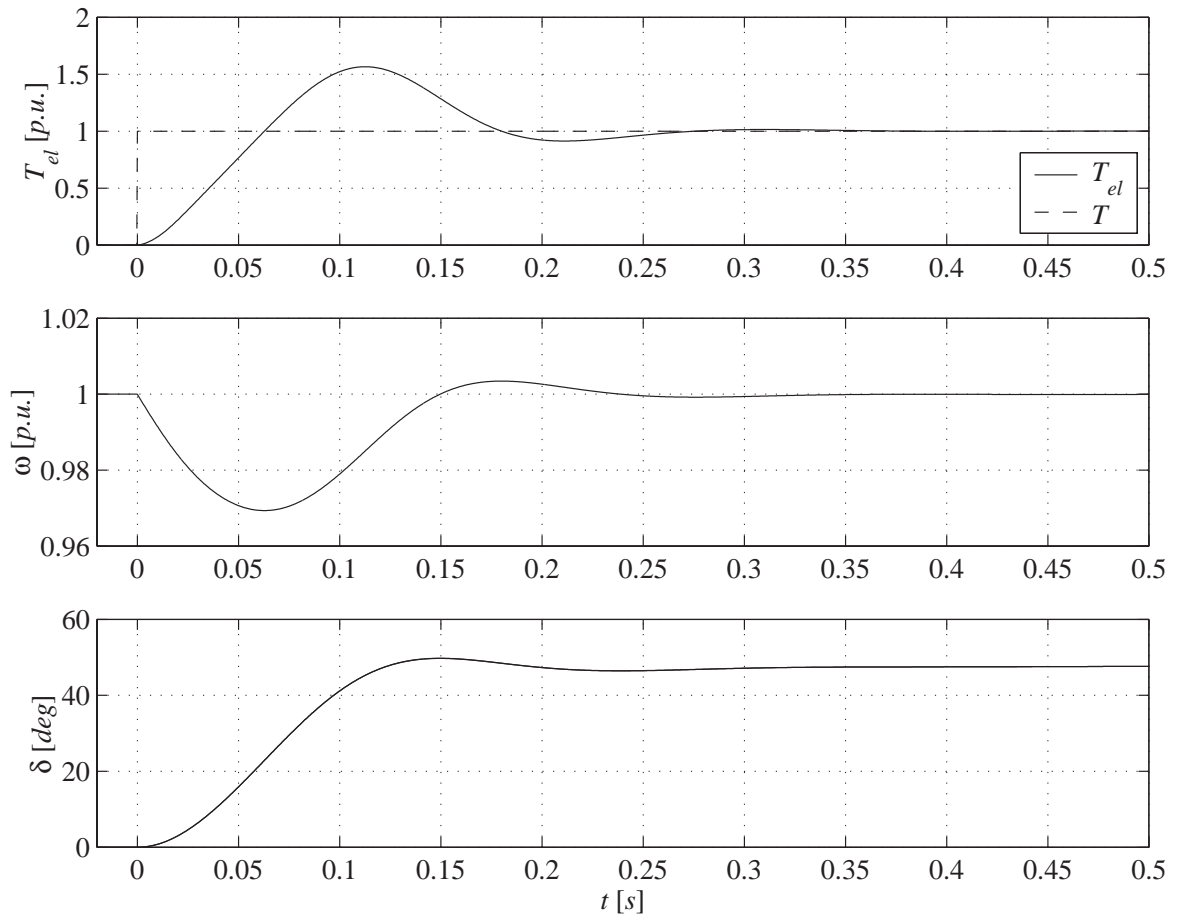
5.3.3 Momentsteg

Momentsteget utförs på motsvarande sätt som i avsnitt 5.2.4. Istället för fasströmmen kommer dämpströmmarna i q -led att verifieras enligt nedan:

- Det elektriska momentet T_{el}
- Den mekaniska vinkelhastigheten ω
- Lastvinkeln δ
- De interna stator strömmarna i_d och i_q
- Den interna fältströmmen i_f
- De interna dämpströmmarna i q -led i_{Q_1} och i_{Q_2}

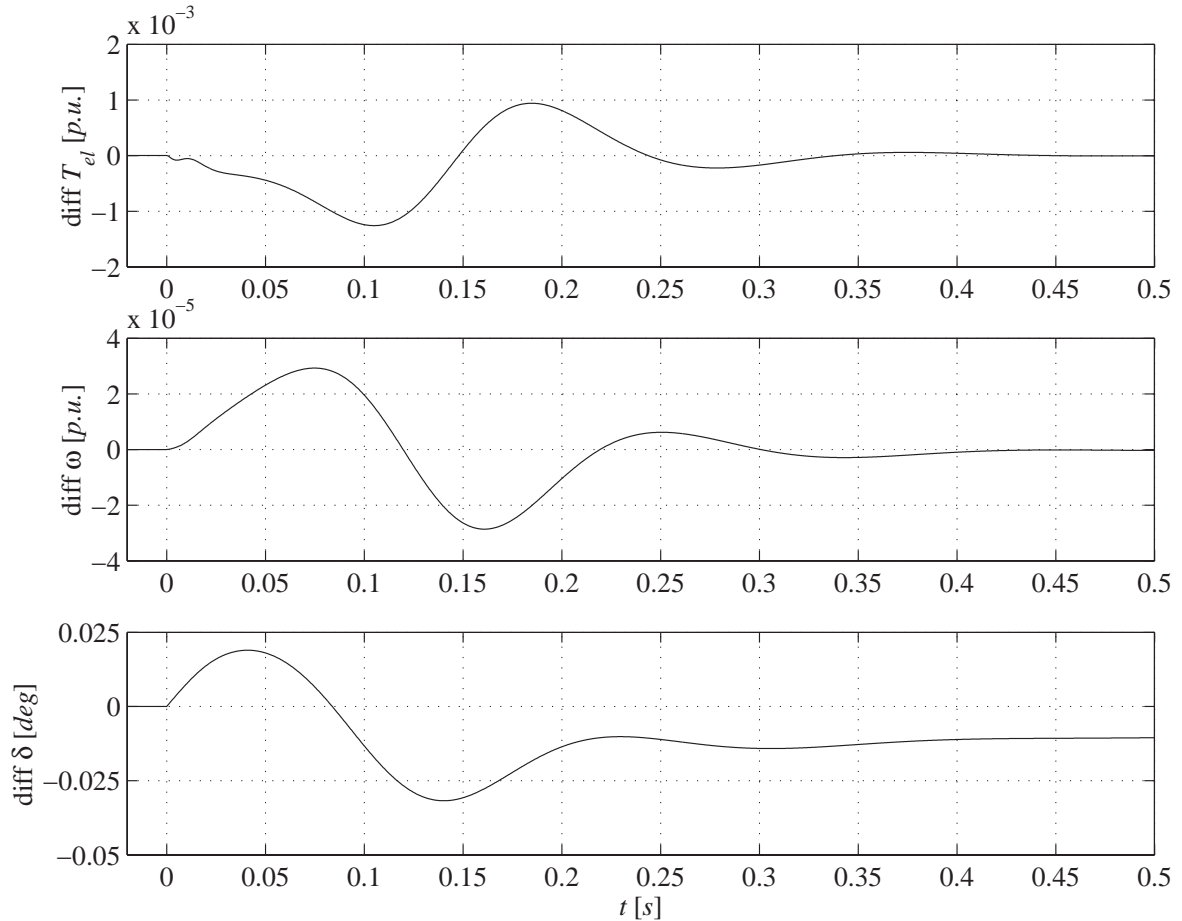
Resultat momentsteg

Resultaten av momentsteget med dubbla dämpindningar i q -led redovisas, från steget vid tiden t_0 till stationärtillstånd, enligt figur 5.8. Stegsvaret påminner om motsvarande för fallet med enkla dämpindningar. Den större dämpningen framgår dock av en mindre översväng i stegsvaret.



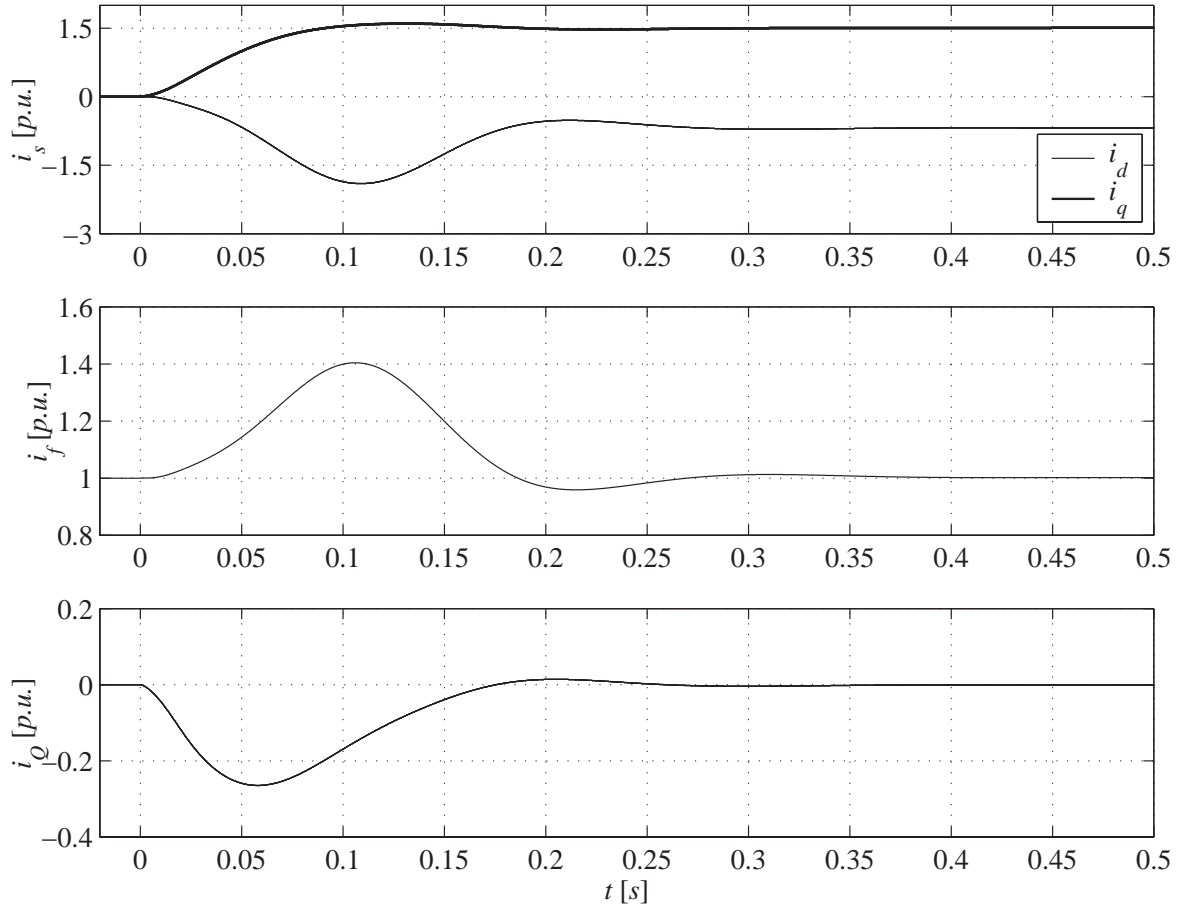
Figur 5.8: Momentstegsvaret för de linjära modellerna med dubbla dämpindningar i q -led, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Det elektriska momentet T_{el} . *Mellan:* Den mekaniska vinkelhastigheten ω . *Nederst:* Lastvinkel δ .

Härav följer att differansen mellan modellerna minskar på motsvarande sätt, som en följd av den ökade dämpningen, se figur 5.9. Figuren visar en rimlig skillnad i jämförelse med motsvarande stegsvar för enkla dämpindningar.



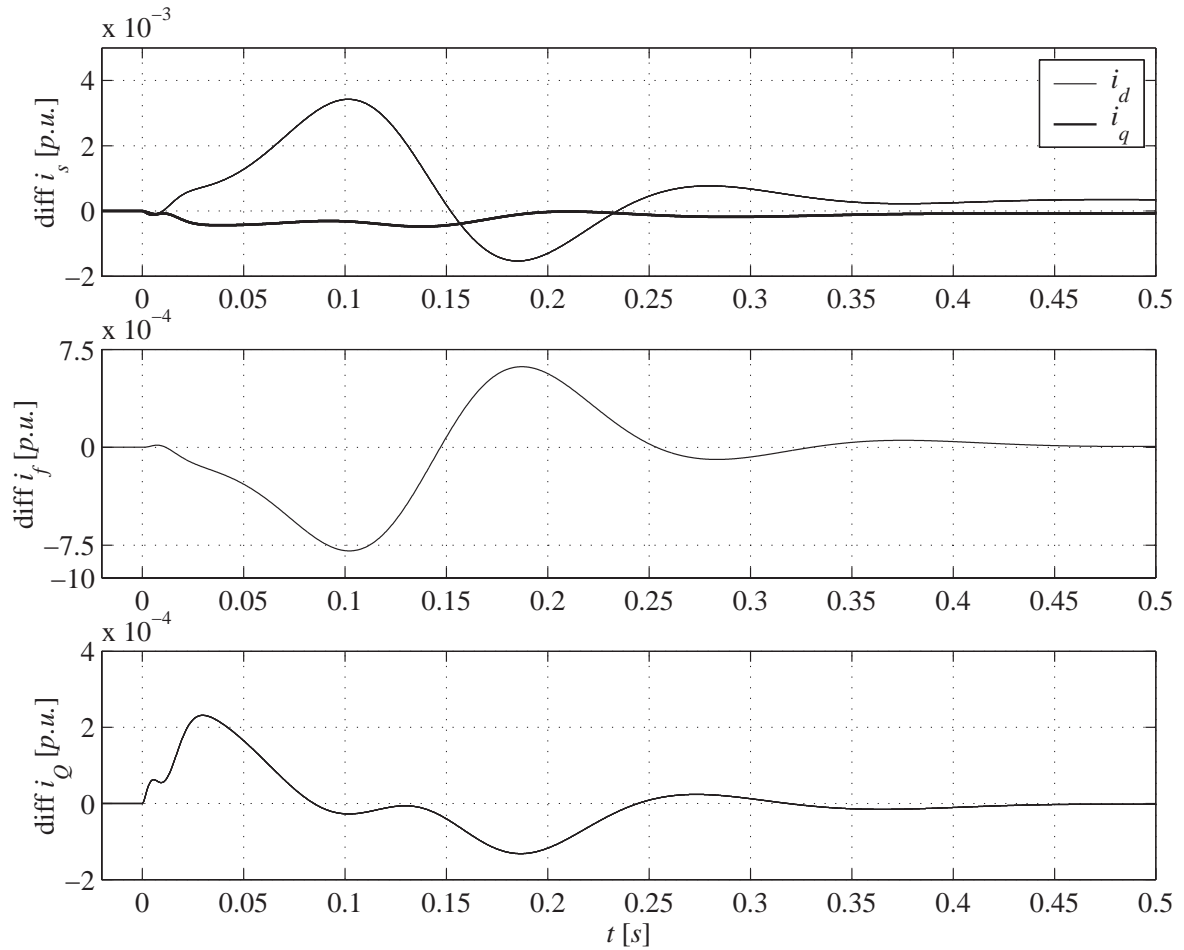
Figur 5.9: Differansen av momentsteget, mellan de linjära modellernas med dubbla dämpindningar i q -led. *Överst:* Det elektriska momentet T_{el} . *Mellan:* Den mekaniska vinkelhastigheten ω . *Nederst:* Lastvinkel δ .

Strömsvaren ger även de ett något mindre utslag. I figur 5.10 visas endast en dämpström i i_q -led då dämplindningarna i i_q -led har identiska parametrar.



Figur 5.10: Dämpströmmarna för de linjära modellerna med dubbla dämplindningar i q -led, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Statorströmmarna i_d och i_q . *Mellan:* Fältströmmen i_f . *Nederst:* Dämpströmmen i_Q .

Statorströmmarna konvergerar mot stationärvärdena och dämpströmmarna klingar av mot noll. Figur 5.11 visar en avvikelse i dämpström på i storleksordningen tiotusendels per unit. Av figuren framgår att implementeringen med dubbla dämpindningar i hög grad överensstämmer med Manitoba-modellens implementering.



Figur 5.11: Skillnaden i dämpströmmarna mellan de linjära modellerna med dubbla dämpindningar i q -led. Överst: Statorströmmarna i_d och i_q . Mellan: Fältströmmen i_f . Nederst: Dämpströmmen i_Q .

5.4 Linjär modell i obalanserat nät

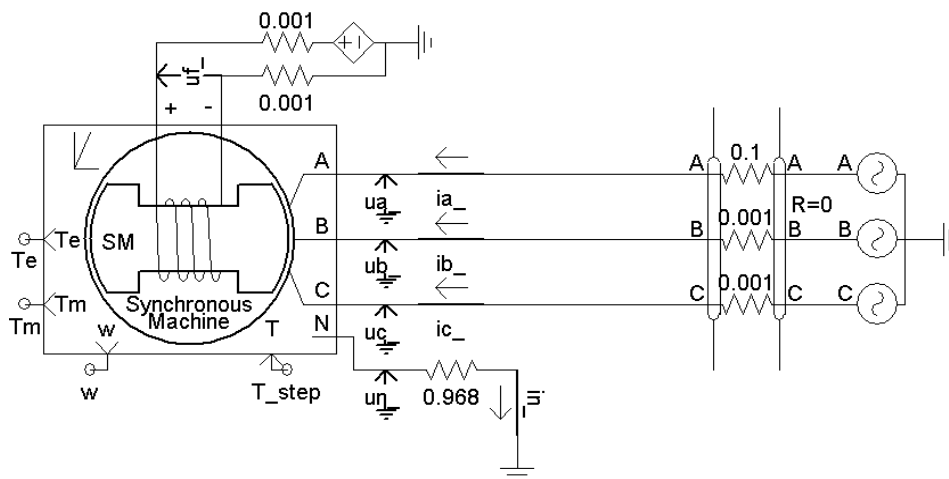
Avsikten med simuleringen av modellen med obalanserad matning är att verifiera implementeringen av spänningsberäkningarna vid klämmorna samt nollföljds-kretsens ekvationer.

Manitoba-modellen har neutralkretsen implementerad internt i form av en seriekrets till jord. NEFI-modellen ger i stället två externa anslutningsmöjligheter för impedansjordning. Dels som y -kopplad stator via en neutralklämma, dels som en externt kortsluten stator.

Manitoba-modellen jämförs mot NEFI-modellen med en neutralklämma. De olika uppkopplingarna av NEFI-modellerna jämförs mot varandra. Seriekretsen består av en resistans mot jord på 0.1 p.u. Modellerna jämförs under linjära förutsättningar.

5.4.1 Uppkoppling

För jämförelsen mellan Manitoba-modellen och NEFI-modellen är NEFI-modellen uppkopplade, enligt figur 5.12. På grund av intern impedansjordning saknar Manitoba-modellen neutralklämma.

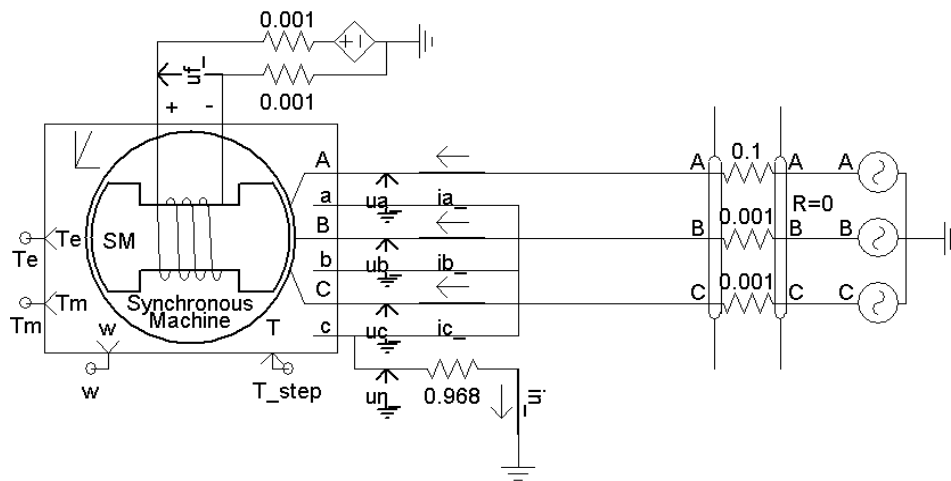


Figur 5.12: NEFI-modellen med impedansjordning.

För jämförelser mellan de olika uppkopplingarna av NEFI-modellerna, kopplas den externa mittpunkten (Y -kopplad) för statorlindningarna enligt figur 5.13.

5.4.2 Maskin- och systemparametrar

Vid en systemkonfiguration med obalans används maskindata, enligt bilaga D. Obalansresistansen i nätet och serieresistansen, se tabell 5.6, ger asymmetri vid last. Maskinens märkdata väljs som systembas, se bilaga C.



Figur 5.13: NEFI-modellen med statorlindningens mittpunkt (Y-kopplad) kopplad utanför modellen.

Ledningsresistans	R_a	0.1	$[\Omega]$
Ledningsresistans	R_b	0.001	$[\Omega]$
Ledningsresistans	R_c	0.001	$[\Omega]$
Serieresistans	R_n	0.1	$[p.u.]$

Tabell 5.6: Impedanser för obalans och impedansjordning.

5.4.3 Momentsteg

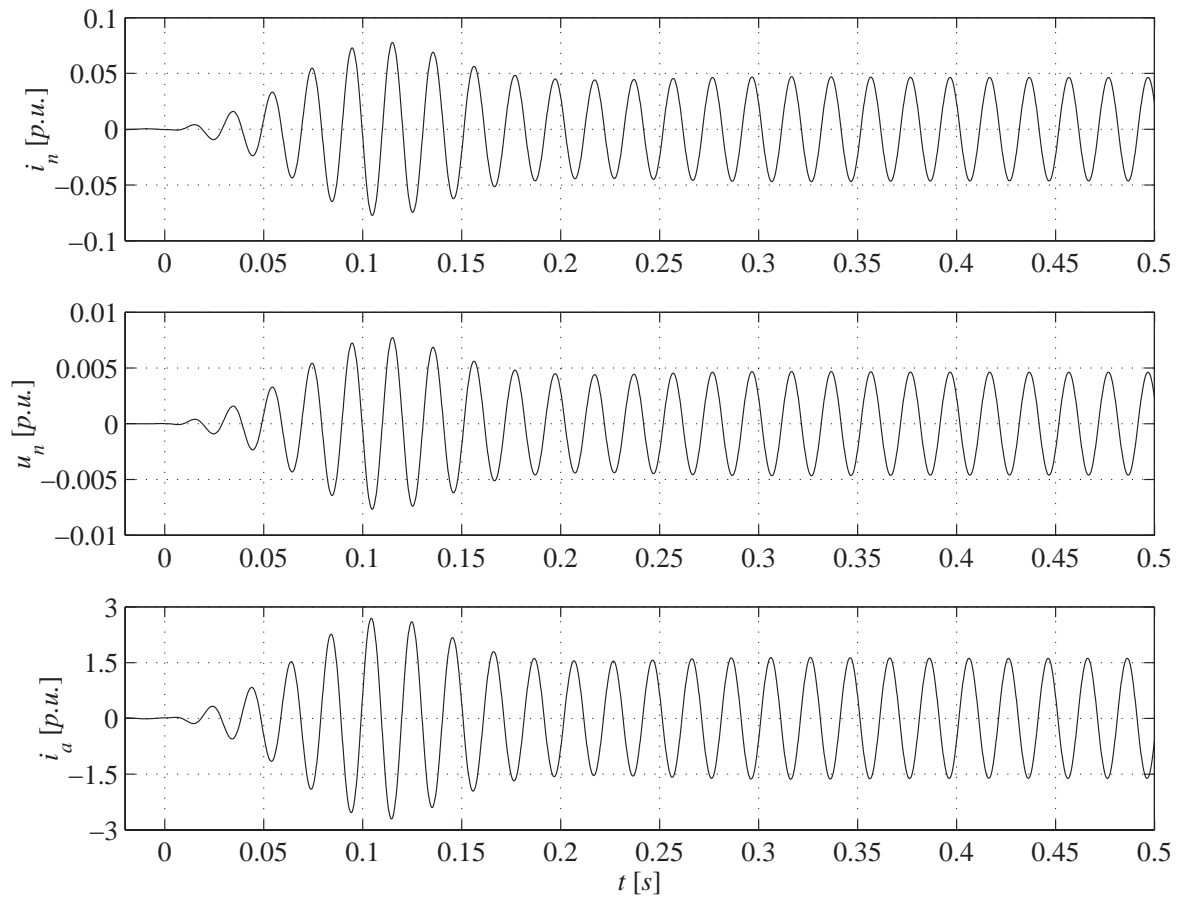
Momentsteget utförs på motsvarande sätt som i avsnitt 5.2.4. Resultaten redovisas med avseende på storheterna nedan:

- Neutralströmmen i_n
- Neutralspänningen u_n
- Fasströmmen i_a

Jämförelsen utförs på samma sätt som i det linjära fallet med tillägg av obalans i det matande nätet. En extra resistans i a -fasen, ger ett asymmetriskt spänningsfall mellan faserna.

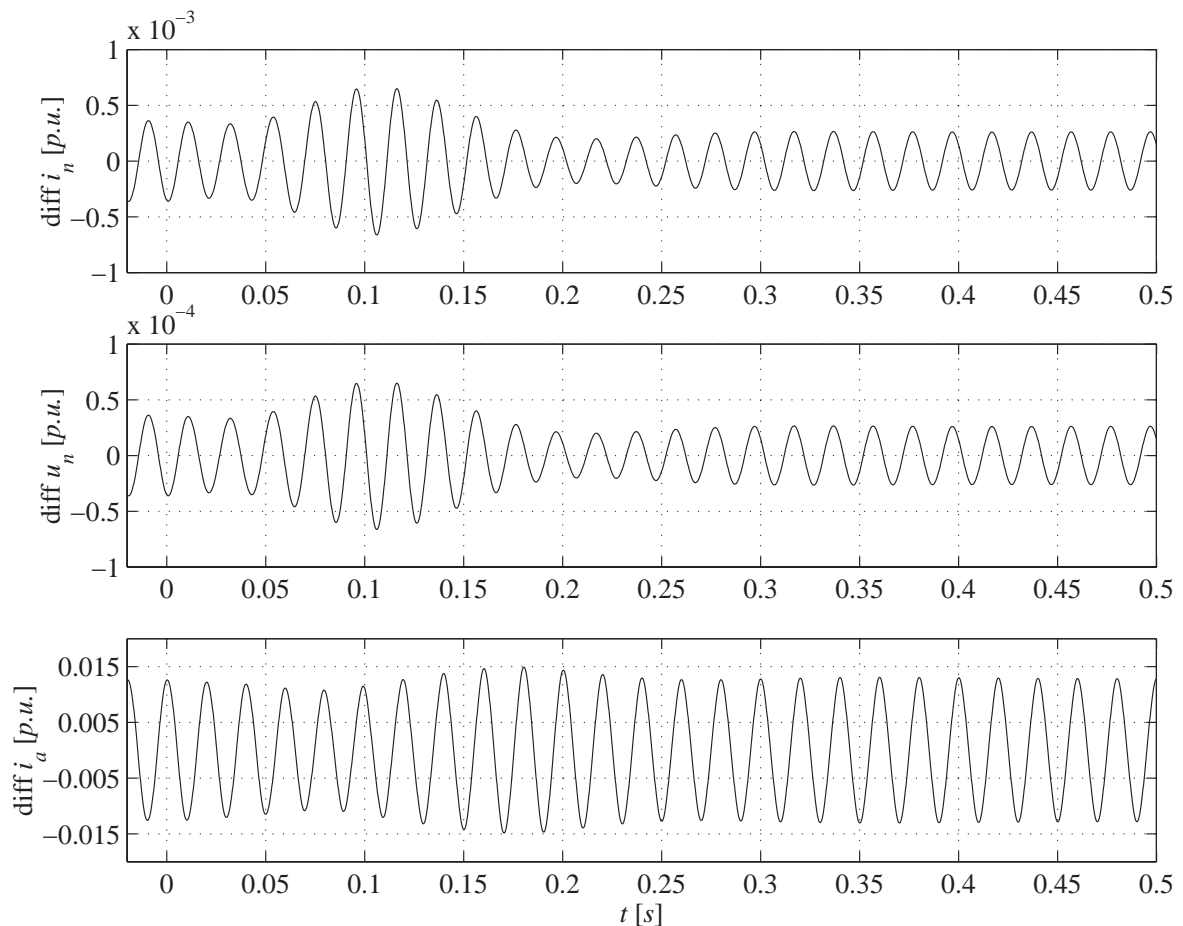
Resultat momentsteg Manitoba-modellen/NEFI-modellen

Resultatet av momentsteget redovisas från steget vid tiden t_0 till stationärtillstånd, enligt figur 5.14. I figuren framgår obalansen av neutralströmmen. På grund av att nollföljdskomponenterna inte transformeras till det roterande dq -planet, resulterar det i att dessa är växlingsstorheter.



Figur 5.14: De linjära modellernas neutralström och neutralspänning vid obalans, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Neutralströmmen i_n . *Mellan:* Neutralspänningen u_n . *Nederst:* Fasströmmen i_a .

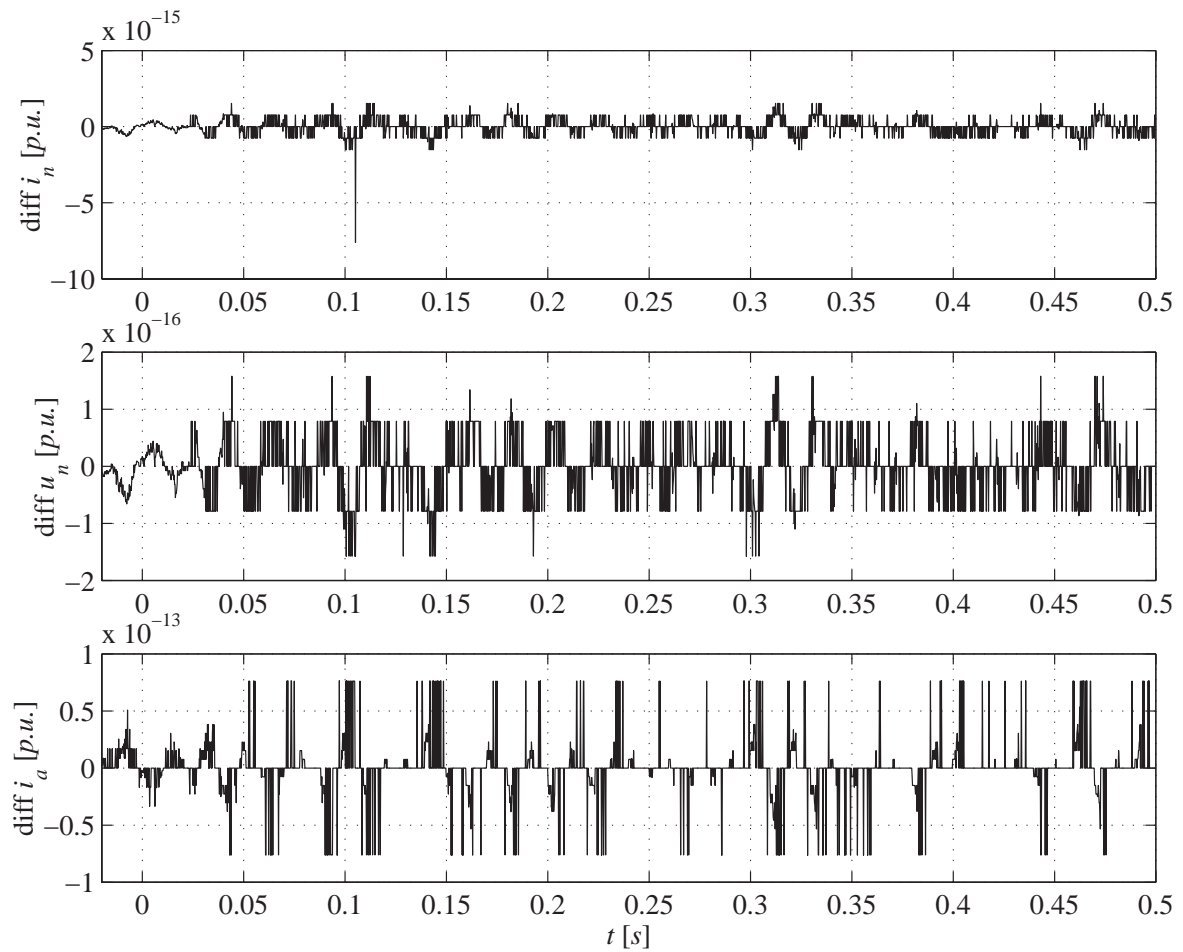
I figur 5.15 visas skillnaden i neutralström och neutralspänning mellan Manitoba-modellen och NEFI-modellen. Neutralströmmen och neutralspänningen avviker redan innan steget, vilket kan förklaras med termineringen av Manitoba-modellen, se bilaga E. Neutralströmmens relativa avvikelser från stationärvärdet, vid steget, ligger på i storleksordning tiotusendels per unit. Resultatet visar att implementeringen av en extern neutralklämma är rimlig.



Figur 5.15: Skillnaden mellan de linjära modellernas neutralström och neutralspänning vid obalans. *Överst:* Neutralströmmen i_n . *Mellan:* Neutralspänningen u_n . *Nederst:* Fasströmmen i_a .

Resultat momentsteg externa impedansjordningar med NEFI-modellen

I figur 5.16 visas skillnaden mellan de olika anslutningssätten, figurerna 5.12 och 5.13, av impedansjordning i NEFI-modellen. Resultatet visar att de olika implementeringarna av anslutningarna mot statorlindningarna är korrekta, då impedansjordningarna är identiska. Graferna visar att avvikelsen ligger på upplösningsskalan.



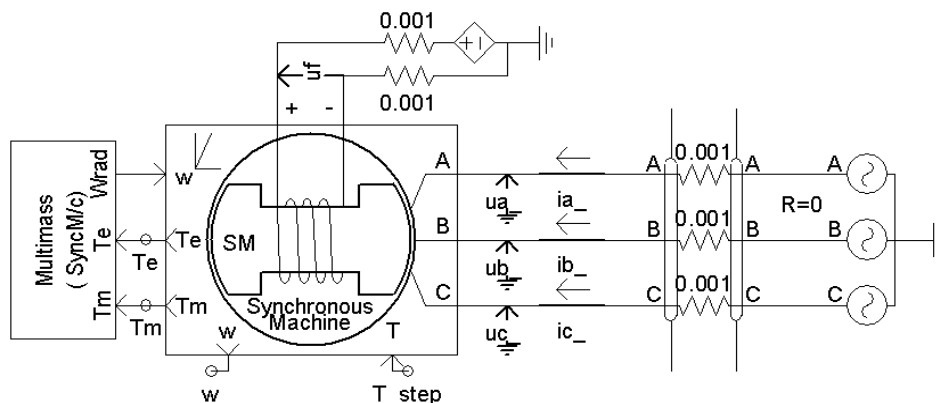
Figur 5.16: Skillnaden mellan de olika anslutningsalternativ av impedansjordning vid obalans. *Överst:* Neutralströmmen i_n . *Mellan:* Neutralspänningen u_n . *Nederst:* Fasströmmen i_a .

5.5 Linjär modell med dubbla massor

Avsikten med simuleringen av modellen med multipla massor är att verifiera implementeringen av den externa hastighetsstyrningen. Vad gäller momentsteget utföra detta på samma sätt som i det linjära fallet.

5.5.1 Uppkoppling

Modellen är uppkopplad i ett system med en extern *Multimass*-komponent, se figur 5.17.



Figur 5.17: Uppkopplingen i EMTDC med en *Multimass*-komponent. *Multimass*-komponenten är en befintlig EMTDC-komponent.

5.5.2 Maskin- och systemparametrar

Parametrarna är valda som enligt avsnitt 5.2.2 med tillägg av en extra massa. *Multimass*-komponenten är en turbinmodell varför den extra massan utgörs av en turbin (eller en godtycklig massa som fritt för rotera med). Turbinen ges samma tröghetsmoment som maskinen och en fjäderkonstant mellan de båda massorna sätts till $1.0 \cdot 10^5$ p.u. Självdämpningen och dämpning mellan massorna sätts till noll.

Då *Multimass*-komponenten är en turbinmodell är NEFI-modellen, till skillnad från de övriga simuleringarna, konfigurerad med generatoriska referenser. Massmodellen har momenten i p.u. som insignal medan vinkelhastigheten däremot ges i rad/s.

5.5.3 Momentsteg

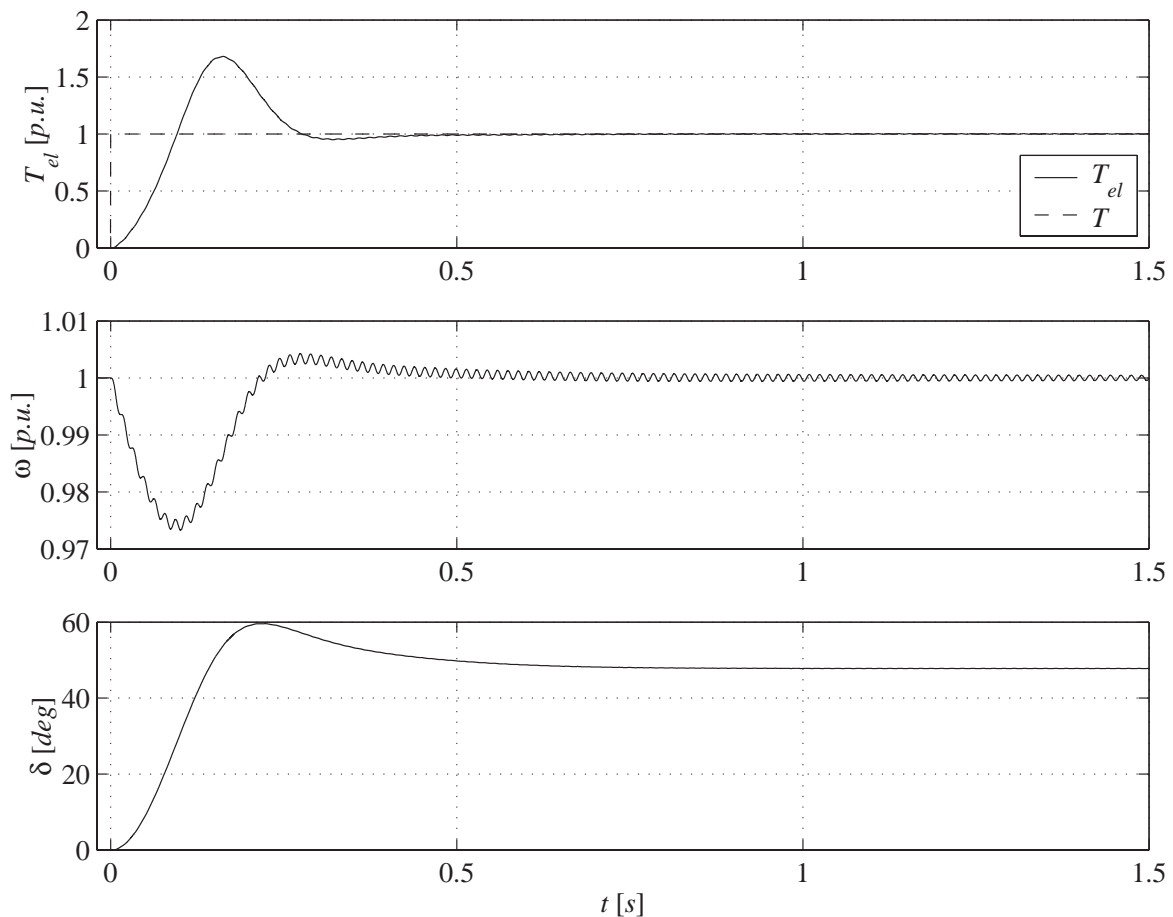
Momentsteget utförs på motsvarande sätt som i avsnitt 5.2.4. De linjära NEFI- och Manitoba-modellerna jämförs med avseende på storheterna nedan:

- Det elektriska momentet T_{el}

- Den mekaniska vinkelhastigheten ω
- Lastvinkeln δ
- De interna strömmarna i_d , i_q och i_f

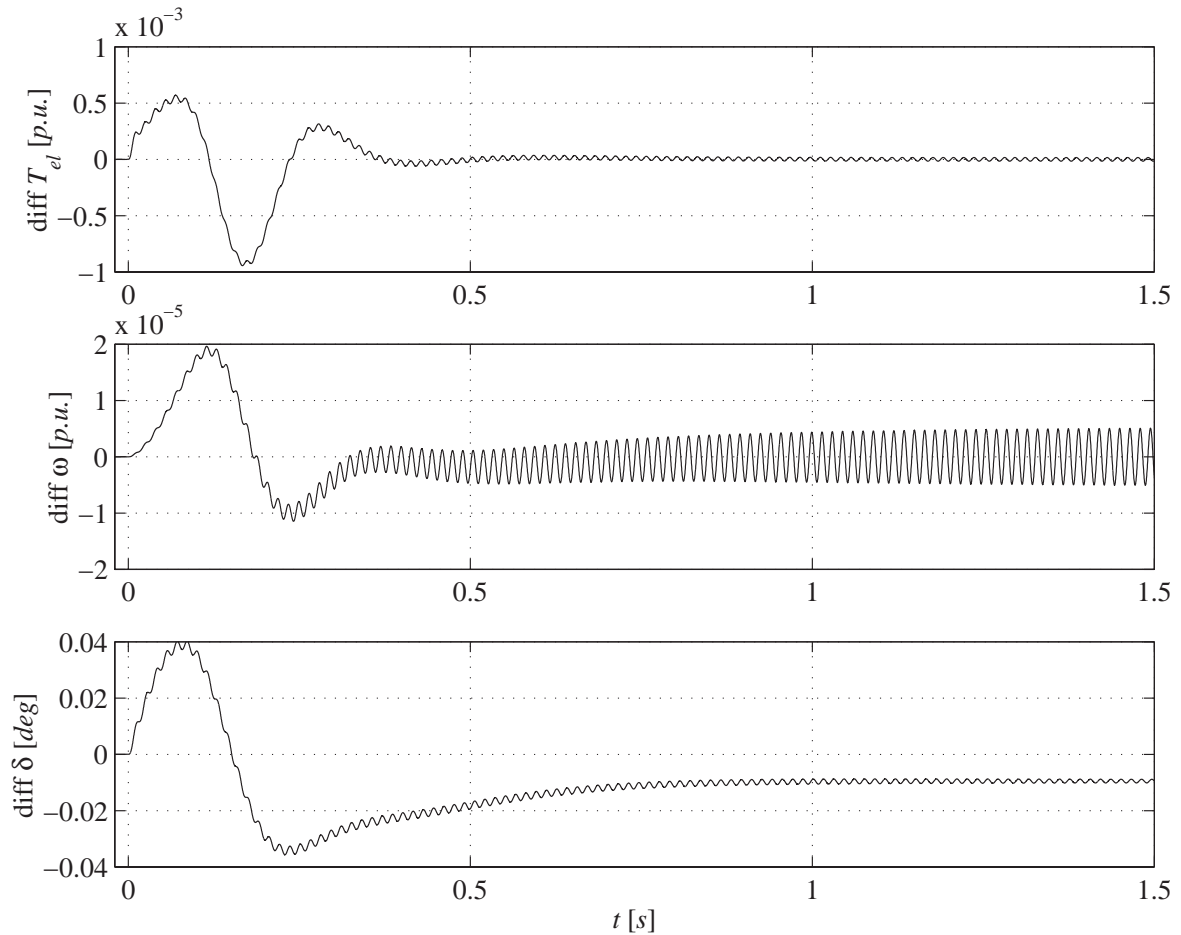
Resultat momentsteg

Resultaten redovisas, från steget vid tiden t_0 till stationärtillstånd, enligt figur 5.18. Den oscillerande rörelsen i vinkelfrekvensen ω beror av att axeln inte är helt stel i kombination med att friktion saknas. I och med att dämpningen i massmodellen saknas fortgår svängningarna även när momentsteget har klingat av. Under steget får lastvinkeln en något högre maxamplitud än motsvarande för en massa däremot begränsas både det elektriska momentet och hastigheten något då de två massorna även motverkar varandra. Däremot är tiden, innan stegetsvaret klingar, ut något längre.



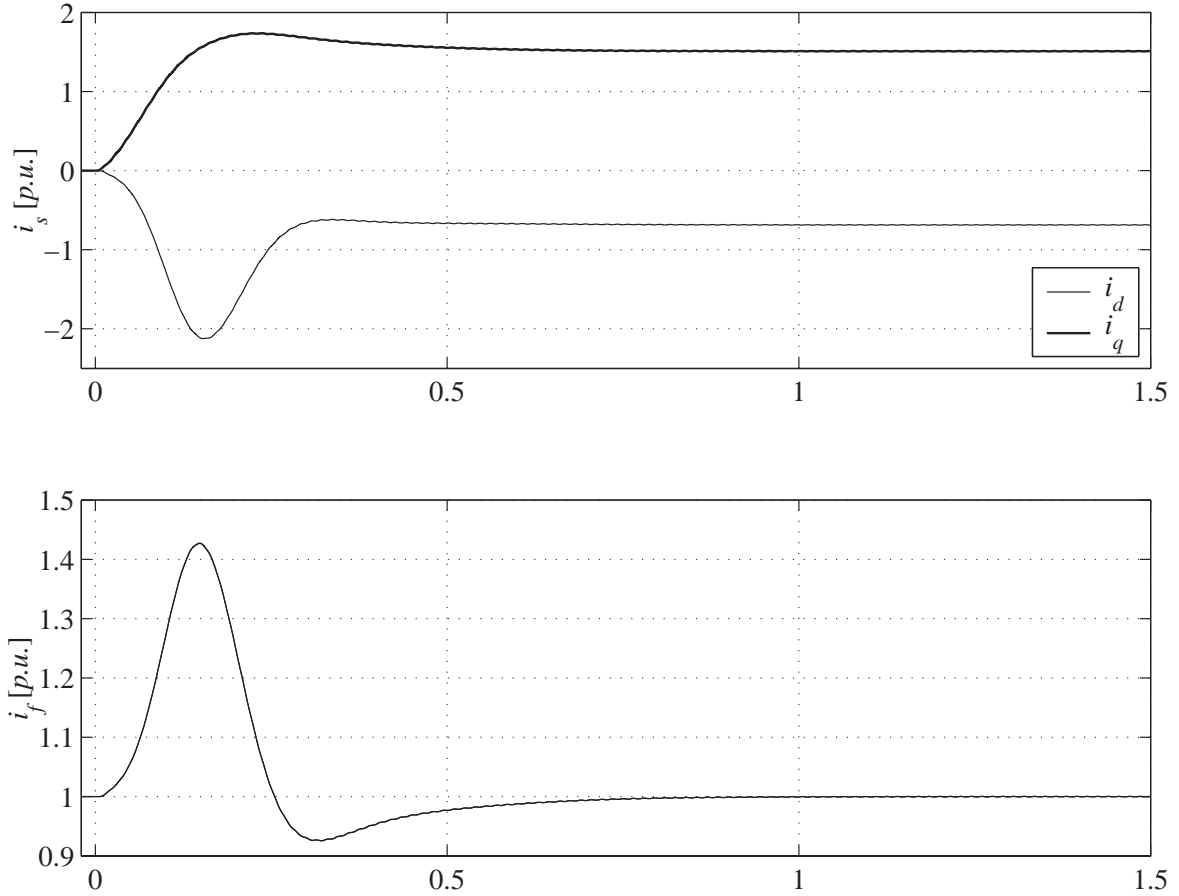
Figur 5.18: De linjära modellernas momentstegsvar, med ett system av dynamiska massor, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Det elektriska momentet T_{el} . *Mellan:* Den mekaniska vinkelhastigheten ω . *Nederst:* Lastvinkel δ .

I figur 5.19 visas avvikelsen i moment, hastighet och lastvinkel mellan modellerna. Den kvarvarande differansen i vinkelhastighet beror på fasskillnad mellan modellerna. Lastvinkeln konvergerar mot samma avvikelse som för motsvarande med en enkel massa.



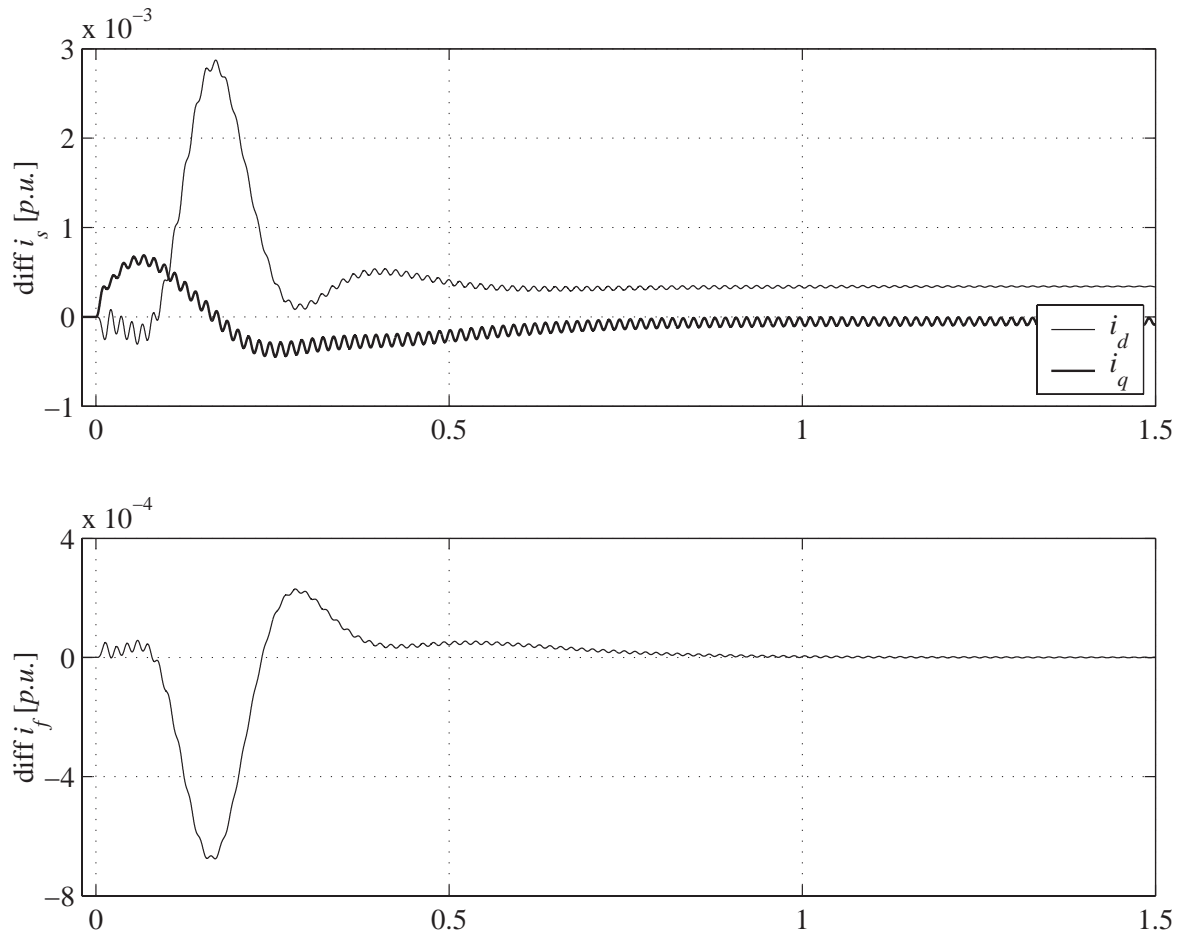
Figur 5.19: Differansen mellan de linjära modellernas momentstegsvar, med ett system av dynamiska massor. *Överst:* Det elektriska momentet T_{el} . *Mellan:* Den mekaniska vinkelhastigheten ω . *Nederst:* Lastvinkel δ .

I figur 5.20 visas strömsvaret och även här konstateras motsvarande skillnader relativt enkel massa som konstaterades i figur 5.18.



Figur 5.20: Strömsvaret med ett system av dynamiska massor. Överst: Statorströmmarna i_d och i_q . Nederst: Fältströmmen i_f .

Differansen i stegsvaret mellan Manitoba-modellen och NEFI-modellen visas i figur 5.21. Den maximala avvikelsen begränsas som en följd av att maxamplituden begränsas av motverkande massor, i jämförelse med motsvarande simulering med enkel massa. Även avvikelserna i strömmarna konvergerar här mot motsvarande för en enkel massa.



Figur 5.21: Skillnaden mellan strömmarna vid ett momentstegsvar med ett system av dynamiska massor. Överst: Statorströmmarna i_d och i_q . Nederst: Fältströmmen i_f .

Detta visar att implementeringen av externt styrd hastighet är relevant. I och med denna simulering anses även teckenkonventionen och typkonverteringen för momenten verifierad.

5.6 Mättad modell med enkla dämplindningar

I simuleringarna med mättade modeller jämförs Manitoba-modellen mot NEFI-modellen. Liksom i det linjära fallet, verifieras maskinmodellerna som motorer. Modellen i Simulink saknar implementering av magnetisk mättning, och är i denna simulering inte intressant att verifiera.

Simuleringen syftar till att verifiera implementeringen av mättningen i d -led. Jämförelserna utförs på samma sätt, med undantag av Simulink-modellen, som i det linjära fallet med stationär- och steganalys, se avsnitt 5.2.

På grund av olika implementeringar av mättning mellan Manitoba-modellen och NEFI-modellen, interpoleras inte den mättade induktansen på samma sätt (linjärt - kubiskt). Detta medför att för samma fältspänning kan inte samma lastvinkel ges. För att göra jämförelsen relevant, kommer därför ett värde på induktansen vid aktuell simulering, att presenteras med övriga resultat. Induktansen beräknas ur det elektriska momentet i stationärtillstånd. Ömsinduktansen löses ur ekvation 2.43.

5.6.1 Uppkoppling

Uppkopplingen är densamma som för den linjära modellen med intern massmodell och isolerad kortsluten statorlindning, se avsnitt 5.2.

5.6.2 Maskin- och systemparametrar

I denna icke linjära modell kommer ömsinduktansen i d -led att påverkas av mättning. Denna strömberoende induktans, ges av maskinens tomgångskurvan. Maskinens parametrar och tomgångskurva beskrivs i bilaga D.

5.6.3 Stationära tillstånd

Stationäranalysen för den icke linjära modellen är genomförd på motsvarande sätt som i det linjära fallet, se avsnitt 5.2.3. Då magnetiseringsinduktansen L_{md} är strömberoende, ges dock en ny definition på fältspänningen vid tomgång respektive märkmoment. I detta fall kommer NEFI-modellen att ligga till grund för definitionerna. Detta på grund av att implementeringen av Manitoba-modellens mättning inte är känd.

För tomgång kan ett teoretiskt värde på induktansen, i NEFI-modellen, beräknas. Utifrån ekvation 2.40 och den mättade induktansen vid tomgång, ges en ny definition på u_{f0} . För att genom iteration omdefiniera u_{fN} , sänks magnetiseringen i NEFI-modellen, vid märklast, så ett $\cos \varphi = 1.0$ erhålls. Resultande fältspänningar redovisas i tabell 5.7.

Simulering i tomgång

Simuleringen i tomgång är genomförd på motsvarande sätt, med motsvarande villkor, som i det linjära fallet, se under motsvarande rubrik i avsnitt 5.2.3. Resultatet visas i tabell 5.8

$T_0 \rightarrow u_{f0}$	4.636363636	[p.u.]
$T_N \rightarrow u_{fN}$	1.872866481	[p.u.]

Tabell 5.7: Definitionerna på fältspänningen vid tomgång respektive märklast, för synkronmaskinmodellen i mätning.

och presenteras som avvikelser från det teoretiska värdet, för respektive modell. Resultatet ska ses som toppvärdet av absolutbeloppet, under några perioder, efter att stationärtillstånd uppnåtts. Detta för att fånga den absoluta maximala avvikelser hos växelstorheterna och även för de storheter, vilka oscillerar i stationärtillstånd.

Storhet	Teoretiskt	Avvikelser		Beräknade värden ²	
		NEFI	Manitoba	NEFI	Manitoba
u_q	$\sqrt{2}$	1.5E-9	1.6E-8	—	—
u_d	0.0	2.0E-9	6.1E-7	—	—
i_d	0.0	3.7E-8	1.1E-5	—	—
i_q	0.0	1.0E-12	2.2E-12	—	—
i_a	0.0	4.8E-10	1.7E-4	—	—
L_{md}	—	—	—	1.6E-1	1.6E-1

Tabell 5.8: Avvikelsen från det teoretiska värdet, vid stationärtillstånd och tomgång i mätning, för u_{f0} . Alla tabellvärden ges i per unit.

Avvikelserna från de teoretiska värdena betraktas som små och därmed rimliga. Induktanserna skiljer sig åt endast på tusendelen². Den kraftiga mätningen, jämför med den omättade magnetiseringsinduktansen på 0.75 p.u., medför att NEFI-modellen extrapolerar tomgångskurvan linjärt (utanför uppmätt område). Detta kan förklara att skillnaden inte är större då Manitoba-modellen troligen har en linjär interpolering (för hela kurvan).

Simulering vid märkmoment

Simuleringen vid märkmoment är genomförd på motsvarande sätt, med motsvarande villkor, som i det linjära fallet, se under motsvarande rubrik i avsnitt 5.2.3. Resultatet visas i tabell 5.9 och presenteras som avvikelser från det teoretiska värdet, för respektive modell. Resultatet ska ses som toppvärdet av absolutbeloppet, under några perioder, efter att stationärtillstånd uppnåtts. Detta för att fånga den absoluta maximala avvikelser hos de storheter, vilka oscillerar i stationärtillstånd.

För märkmoment och stationärtillstånd är avvikelserna mycket låga, med undantag av den reaktiva effekten på Manitoba-modellen. Återigen härrör sig avvikelserna till termineringen vid klämmorna, se bilaga E. Mätningen är inte lika kraftig och interpoleringen mellan modeller-

²Induktanserna är beräknade ur uppmätta strömmar och elektriskt moment.

Storhet	Teoretiskt	Avvikelser		Beräknade värden ³	
		NEFI	Manitoba	NEFI	Manitoba
T_{el}	1.0	3.6E-11	2.0E-11	—	—
P_m	1.0	5.3E-11	-4.1E-11	—	—
Q_m	0.0	3.1E-10	-1.7E-2	—	—
L_{md}	—	—	—	4.7E-1	4.6E-1

Tabell 5.9: Avvikelsen från det teoretiska värdet, vid stationärtillstånd och T_N för $\cos \varphi = 1.0$ i mätning. Alla tabellvärden ges i per unit.

na skiljer sig här (inom uppmätt område på tomgångskurvan), vilket framgår av skillnaden i magnetiseringsinduktansen³.

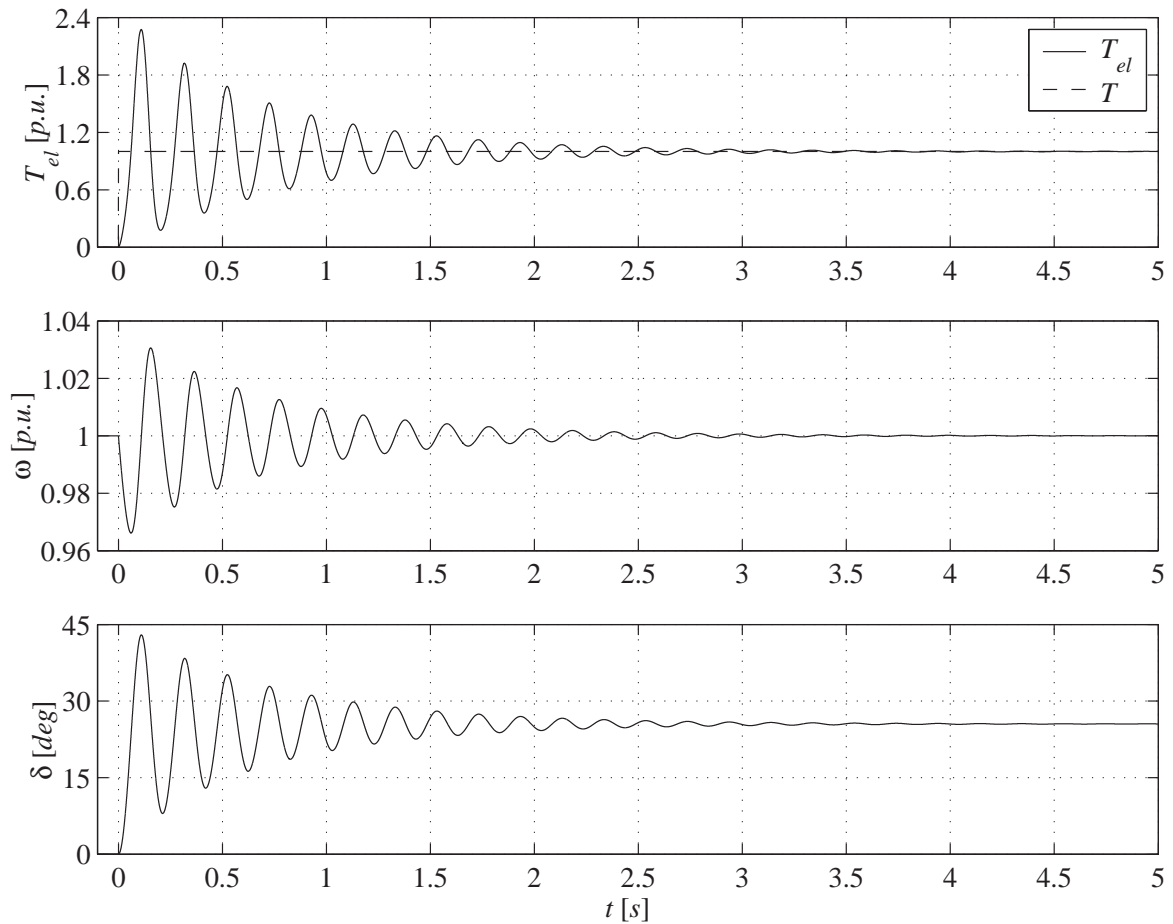
5.6.4 Momentsteg

Momentsteget appliceras på samma sätt som i det linjära fallet med motsvarande förutsättningar. Notera dock, att för denna mättade modell, är fältspänningarna u_{f0} och u_{fN} omdefinierade, enligt tabell 5.7. För Manitoba-modellen är den Y-kopplade statorlindningen isolerad med en resistans på 100 k Ω . Momentet appliceras externt, liksom fältspänningen på Manitoba-modellen. På NEFI-modellen är fältspänningen reglerad i modellen (som signal) för att undvika påverkan av spänningsfallet i fältmatningskretsen. För närmare beskrivning av förutsättningarna, se avsnitt 5.2.4.

³Induktanserna är beräknade ur uppmätta strömmar och elektriskt moment.

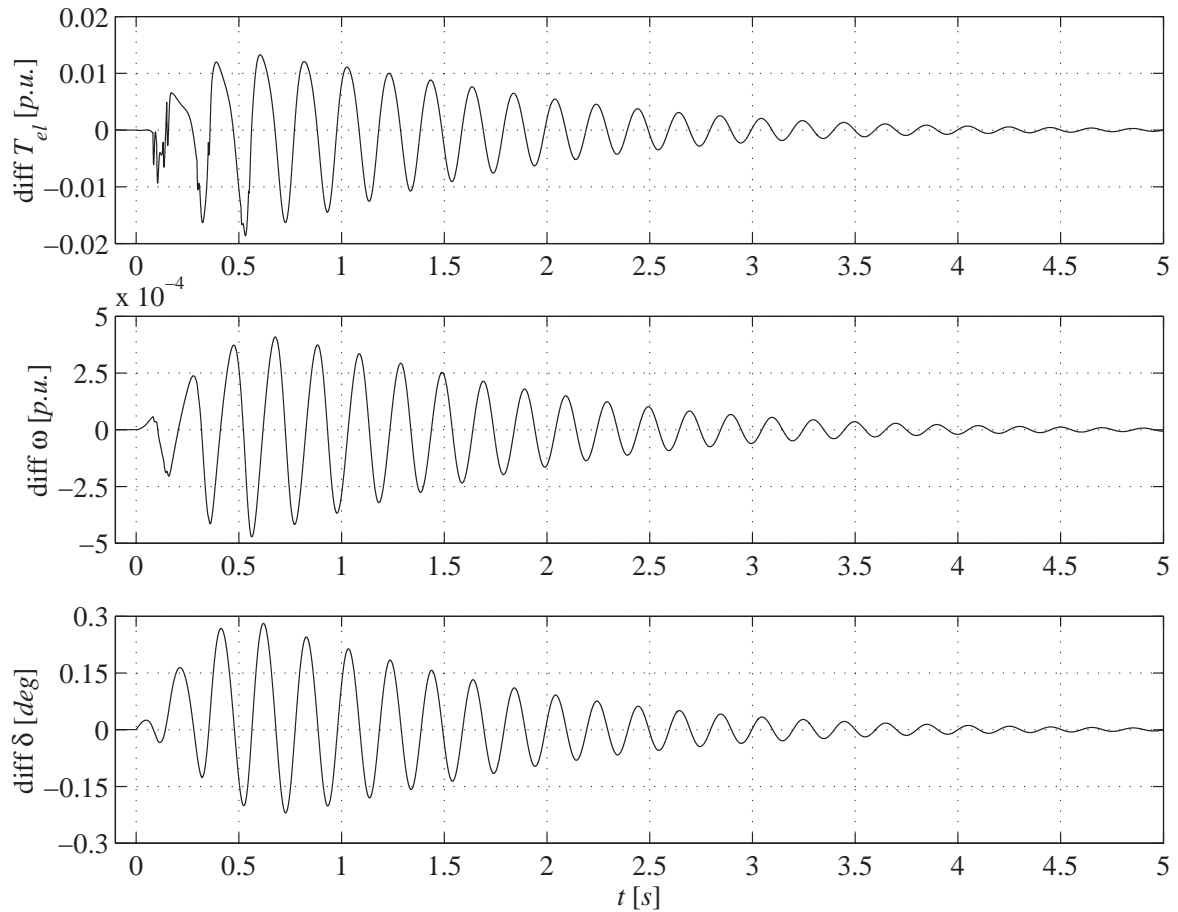
Resultat Momentsteg

Resultaten redovisas från steget vid tiden t_0 till stationärtillstånd, enligt figur 5.22. Momentsteget sätter maskinen i kraftig svängning, där lastvinkel oscillerar kring sitt nya värde med upp till $\pm 15 - 20^\circ$. Insvängningsförloppet äger rum under tio sekunder, då maskinen åter når stationärtillstånd. Den mättade modellen skiljer sig därvid avsevärt från den linjära dito, på grund av den kraftiga mättningen.



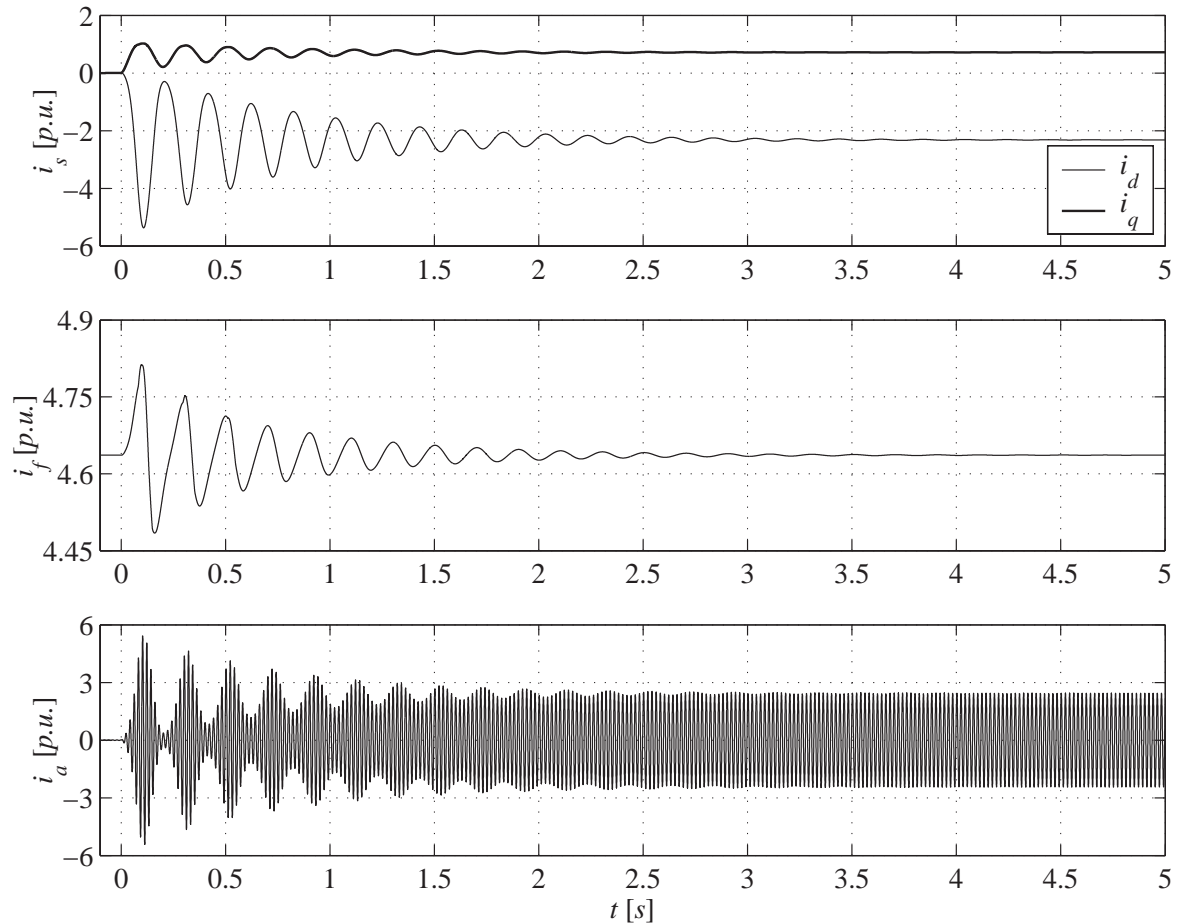
Figur 5.22: Kurvorna visar de icke-linjära modellernas svar, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . Överst: Det elektriska momentet T_{el} . Mellan: Den mekaniska vinkelhastigheten ω . Nederst: Lastvinkel δ .

Avvikelsen mellan Manitoba-modellen och NEFI-modellen visas i figur 5.23. De kraftiga svängningarna i kombination med olika linjäriseringar, medverkar till att modellerna inte ligger helt i fas. Avvikelserna blir stora men konvergerar dock mot noll eller nära noll. De kvarvarande avvikelserna i stationärtillståndet efter momentsteget, redovisas närmare i tabell 5.10.



Figur 5.23: Differansen mellan de icke linjära Manitoba- och NEFI-modellerna, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Elektriskt momentet T_{el} . *Mellan:* Den mekaniska vinkelhastigheten ω . *Nederst:* Lastvinkel δ .

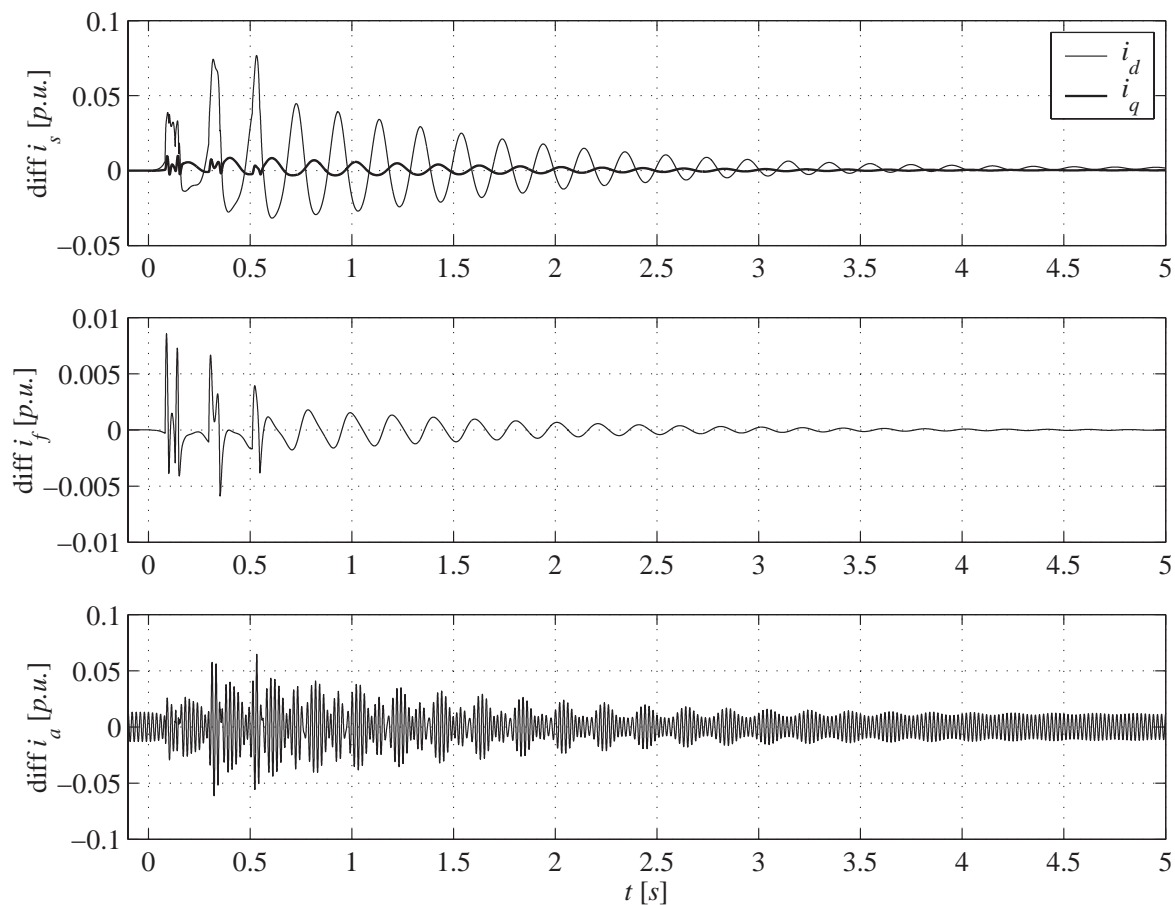
Strömsvaren visas i figur 5.24. Effektfaktorn efter steget är låg. För fasströmmen i_a ökar amplituden och RMS-värdet når knappt 2.0 p.u. Fältströmmen i_f svänger till men konvergerar mot pålagd fältspänning inom tio sekunder.



Figur 5.24: Kurvorna visar de icke-linjära modellernas svar, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . Överst: Statorströmmarna i_d och i_q . Mellan: Fältströmmen i_f . Nederst: Fasströmmen i_a .

Den normerande basen för fältströmmen i_f är inte densamma som för de övriga strömmarna. Som normerande ström i fältkretsen använd i stället den ström som spänningen u_{f0} ger vid tomgång och för den linjära induktansen L_{md} , se ekvation 2.40.

Avvikelsen av strömmarna presenteras i figur 5.25. Differansen för statorströmmarna och fältströmmen går mot nära noll. De kvarvarande avvikelserna i stationärtillståndet efter momentsteget, redovisas närmare i tabell 5.10.



Figur 5.25: Skillnaden mellan de icke linjära Manitoba- och NEFI-modellerna, under insvängning mot pålagt märkmoment T_N . *Överst:* Strömmen i_s , med vardera komponent. *Mellan:* Fältström i_f mellan modellerna. *Nederst:* Fasströmmen i_a .

Sprången i fältströmmen kan förklaras med skillnaden mellan modellernas interpolering. Linjär interpolering (Manitoba-modellen) ger inte en kontinuerlig derivata, vilket kubisk interpolering gör, se bilaga B.

Som komplettering till föregående grafer redovisas stationärvärdena för den mättade modellen vid märkmoment och u_{f0} , se tabell 5.10. Avvikelsen för stationärvärdena kommer givetvis att bero på magnetiseringsströmmen och hur nära en avläst nod i tomgångskurva strömmen hamnar. På en nod skiljer sig inte det interpolerade värdet på induktansen mellan interpoleringsmetoderna.

Storhet	Differans mellan Manitoba och NEFI
T_{el}	-2.0E-8
ω	0.0
δ	3.1E-4
i_d	1.6E-3
i_q	2.5E-4
i_f	1.0E-6
i_a	$\pm 1.2E-2$

Tabell 5.10: Den icke linjära modellens kvarvarande avvikelserna i stationärtillstånd efter momentsteget. Alla tabellvärden ges i per unit undantaget δ , vilken anges i grader.

Den icke linjära modellen ger större avvikelser än den linjära modellen. Avvikelserna är fortfarande rimliga och beror till stor del på olika interpoleringsmetoder. Resultatet visar dock att den kubiska Hermite-interpoleringen ger en bättre representation av mätningen, bland annat på grund av en kontinuerlig derivata.

5.7 Sammanfattning

Simulink-modellen används för att verifiera kod-översättningen från MATLAB m-filformat till Fortrankod i NEFI-modellen. Båda modellerna är egenutvecklade men där Simulink-modellen ingår främst i de stationära verifieringarna. Den befintliga modellen, kallad Manitoba-modellen, utgör referensmodell för den slutliga NEFI-modellen, främst i de dynamiska verifieringarna i EMTDC.

Jämförelsen mellan de linjära modellerna i stationärtillstånd och tomgång visar på avvikelser från de teoretiska värdena på i storleksordning 10^{-9} p.u. för NEFI-modellen. Simuleringen av Manitoba-modellen visar dock på en extern fasström som inte genereras av modellen i dq -planet. Avvikelsen på någon hundra delar per unit härrör sig från termineringen av anslutningsklämmorna i Manitoba-modellen, vilken saknas på de andra två modellerna. Vid märkmoment är avvikelserna något större för båda modellerna i EMTDC. Nätmodellen i EMTDC medger spänningsfall och detta ger upphov till avvikelser i den reaktiva effekten.

NEFI-modellen verifieras för olika konfigurationar, med och utan mätning. Dynamiskt verifieras NEFI-modellen mot Manitoba-modellen genom att applicera ett momentsteg vid tomgång. Momentsteget motsvarar märkmomentet och ligger på tills modellerna når stationärtillstånd. För de flesta simuleringar ligger de transienta avvikelserna för strömmarna, momentet och

vinkelhastigheten på upp till tusendels per unit. Stationärt konvergerar avvikelserna för moment, vinkelhastighet och fältström mot noll. Övriga stationära avvikelser är inte större än bråkdelar av de maximala transienta avvikelserna.

Viss funktionalitet som är implementerad i NEFI-modellen saknas i Manitoba-modellen. NEFI-modellen verifieras därför mot olika alternativa konfigureringar. De externa anslutningsmöjligheterna för neutralkretsen finns bara i NEFI-modellen. Resultatet visar att NEFI-modellen med en externt kopplad mittpunkt i det närmaste är identisk med NEFI-modellen med mittpunkt framdragen till klämma. I alla verifieringar mot Manitoba-modellen (och Simulink-modellen) är fältspänningen satts som signal för att verifieringarna ska vara jämförbara. I dessa simuleringar är NEFI-modellens fältspänningen satt internt. Vid jämförelse mellan intern och extern fältspänning (NEFI-modellen) visar den externa matningen på en rimlig återkoppling med spänningsfallet över nätimpedansen.

Konfigurerad för strömberoende induktanserna verifieras NEFI-modellen enbart mot Manitoba-modellen. I det stationära fallet i tomgång visar båda modellerna en något större avvikelse i jämförelse än det linjära fallet. Mätningen är mycket kraftig där magnetiseringsinduktansen endast motsvarar en femtedel av den linjära induktansen. Däremot är avvikelsen från de teoretiska värdena vid märkmoment mycket små, med undantag av Manitoba-modellens reaktiva effekt (p.g.a. termineringen). Den mättade induktansen ligger, vid märkmoment och $\cos \varphi = 1.0$, på cirka $\frac{3}{5}$. Här framgår skillnaderna mellan modellernas interpoleringsmetoder tydligare, ungefär en hundradels per unit skiljer mellan modellerna.

Med den mättade modellen blir oscillationen av stegsvaret avsevärt längre. Avvikelserna är i storleksordningen tio gånger större än för motsvarande linjära konfiguration. NEFI-modellen med Hermite-interpolering av tomgångskurvan ger en mjukare kurva än Manitoba-modellen med linjär interpolation. Detta visas tydligt i kurvan som visar avvikelsen i fältström. På grund av en diskontinuerlig induktansderivata orsakas språng i fältströmmen.

Kapitel 6

Slutsats

Då modellen är avsedd för användning i EMTDC är det naturligt att göra jämförelser mot den befintliga synkronmaskinmodellen. Simuleringarna visar att överensstämmelsen mellan modellerna är god. Konfigurerade för linjära induktanser var avvikelsernas storlek som störst tusendels per unit och för strömberoende induktanser var motsvarande avvikelse hundradels per unit. Båda modellerna bygger på det roterande $dq0$ -planet, men de skiljer sig åt på så sätt att Manitoba-modellen beräknas i per unit-bas medan NEFI-modellen beräknas i absoluta storheter. Grafiskt är NEFI-modellen anpassad för befintliga massmodeller. Däremot är, av förklarliga skäl, exciter-modellerna inte direkt applicerbara.

Fördelen med det elektriska gränssnittet för fältlindningsmatningen, som anpassning mot kretsutbyggda matare, är att man i högre grad ges möjlighet att bygga upp styrningen av maskinen elektriskt, exempelvis med roterande matare.

En annan skillnad gäller implementeringen av alternativa anslutningar mot statorlindningarna. Med NEFI-modellen kan man koppla mittpunkten externt (om statorn y -kopplas!), vilket medför goda möjligheter att studera neutralkretsen. Detta är en intern lösning i Manitoba-modellen, där mittpunkten endast kan impedansjordas.

Mätningen av magnetiseringsinduktansen i d -led med Hermite-interpolation ger en jämn och kontinuerlig mätningskurva. Manitoba-modellens styckvis linjära interpolation visar på mätbara diskontinuiteter för den interpolerade induktansderivatan vilka saknas i NEFI-modellen tack vare den kubiska interpoleringen.

Med utgångspunkt från NEFI-modellen och dess öppna källkod kan vidareutveckling, utökningar och förbättringar, enkelt genomföras med Fortran-kod. Strukturen i programkoden är enkel och funktioner liksom subrutiner, ersätts eller kompletteras utan större svårigheter.

En möjlig brist kan vara NEFI-modellens avsaknad av terminering vid anslutningsklämmorna. I denna rapport är inte något kortslutningsprov genomfört och därför har inte några betydande skillnader mellan terminerad och icke terminerad modell kunnat påvisats. Det är däremot troligt att avsaknaden av terminering har en påverkan, vilket stärks av att Manitoba har av detta skäl valt att implementera en sådan lösning. Insikten om ett eventuellt behovet av terminering har under senare delen av projektet blivit tydligare, men behovet har tyvärr inte kunnat utredas vidare inom ramen för detta projekt.

6.1 Förslag till fortsatt arbete

För vidare utveckling av synkronmaskinmodellen föreslås här både mindre och större utökningar. Ett exempel är att förbättra användargränssnittet med stöd för felmeddelanden. Ett annat exempel är implementering av en nollföljdsimpedans som skiljer sig från den ekvivalenta statorresistansen ($Z_s > Z_0$).

Genom möjligheten att välja till olika modellimplementationer kan krav på noggrannhet och snabbhet kombineras. Hastighetsoptimering med förkortad cykeltid kan uppnås genom t.ex. alternativa interpoleringsmetoder och möjligheten att kunna stänga av monitorerade signaler. För de fall där fältlindningen inte avses att verifieras elektriskt kan ett alternativt signalgränssnitt implementeras.

Ett antal större och mer omfattande utökningar med avsikten att öka noggrannheten av modellen föreslås nedan:

6.1.1 Mer sofistikerad integration

Förfina integreringen av lösning från tillståndsmodellen. I denna modell används Euler forward (stegmetoden), vilken är en snabb, men i vissa fall, en grov metod. Eftersom man kan välja olika numeriska integreringsmetoder i modellen kan både krav på hastighet och precision uppfyllas. Runge-Kutta integration är ett exempel på en förbättrad lösningsmetod.

6.1.2 Kopplat flöde och korskopplingstermer.

I denna modell är endast luftgapsflödet kopplat. En utökning med läckflöde och koppling mellan fältlindningen och dämplindningen i d -led kan förbättra modellrepresentationen, liksom motsvarande för lindningarna i q -led.

Med en fördjupad undersökning studera inverkan av koppling mellan d - och q -led vid magnetiserad mättningskurva. I vilken grad påverkar kopplingstermerna en synkronmaskinmodell med utpräglade poler? Erhålls en förbättrad representation av maskinen? Är den i så fall knuten till var mättningskurvan inträffar i maskinen.

6.1.3 Mättningskurva av luftgapsflödet i q -led.

Olika modeller för mättningskurva i q -led kan implementeras. Symmetrisk mättningskurva, d.v.s. att mättningskaraktäristiken är lika i d - och q -led (beloppet av flödesvektorerna), motsvarar mättningskurvan i en rund rotor (turbomaskinen). Individuella mättningskurvor i d - respektive q -led är typiska för utpräglade poler.

6.1.4 Mättningskurva av modellens statorläckflöde.

För vissa maskiner är mättningskurvan av statorns läckflöde påtagligt (mättningskurva i tändarna). Här kan implementering av ett ickelinjärt statorläckflöde vara tänkbar och i så fall med egen

mättningskaraktäristik, men metoden är identisk med metoden vid huvudflödesmättningen.

6.1.5 Kabelmodell i statorn

I nuvarande modell tas ingen hänsyn till kapacitans i statorn. För en kabellindad stator är det därför nödvändigt att komplettera denna med en kabelmodell. I det enklaste fallet kan en shuntkapacitans på anslutningsklämmorna ge en approximation av kabelns kapacitans. I en bättre modell modelleras kabeln med ett flertal π -länkar.

6.1.6 Terminering

För att kunna modellera vissa transienta beteenden är det nödvändigt att låta terminera anslutningsklämmorna på maskinmodellen. Detta för att undvika att modellen uppträder som en öppen krets för branta spänningssteg. En shuntimpedans som motsvarar maskinens karaktäristiska impedans får ingå i det elektriska nätet för att ett bättre transient beteende skall skapas. För att kompensera den felström som uppstår kompenseras denna med en strömkälla.

I utgiven version 1.0 av NEFI-modellen finns denna uppkoppling implementerad. Den är inte på något sätt verifierad utan främst tänkt för vidare utveckling. Med hjälp av denna kan man studera skillnaden mellan terminerade och icke-terminerade anslutningsklämmor. På komponentens konfigureringsida ges möjligheten att koppla till eller från termineringen. Den karaktäristiska impedansen beräknas här i H , ej i per unit. Vid simulering visar det sig att impedansvärdet på 100% av den subtransienta impedansen gör modellen instabil och att även längden på tidssteget påverkar stabiliteten¹. Därför finns möjligheten att variera storleken på impedansen med en viss faktor. Denna kan kopplas till ett skjutreglage för dynamisk variation.

¹Testuppkopplingar med en motor på 5 kVA respektive 40 MVA med isolerade klämmor(100 k Ω) visar sig instabil för resistanser beräknade på mindre än 20 % och större än 70 % av den karaktäristiska impedansen vid ett tidssteg på 50 μ s

Litteraturförteckning

- [1] Alaküla, M. (1989) *Rotororienterad Reglering av Synkronmaskiner*. Göteborg: Sektionen för Elektro- och Datorteknik, Chalmers Tekniska Högskola. Technical Report No. 67L. ISBN 91-7032-418-2.
- [2] Bergen A.R. and Vittal V. (2000) *Power Systems Analysis*. 2:nd edition. New Jersey: Prentice Hall ISBN 0-13-691990-1.
- [3] Hallenius K-E. (1987) *Transients in Electrical Machines*. Gotheburg: Department of Electrical Machines and Power Electronics, Chalmers University of Technologies.
- [4] Heath, M.T. (1997) *Scientific Computing: An Introductory Survey*. Singapore: McGraw-Hill ISBN 0-07-115336-5.
- [5] Lennartsson, B. (2000) *Reglerteknikens grunder*. 2:a upplagan. Göteborg: Studentlitteratur. ISBN 91-44-01617-4.
- [6] Loumi, J. (1998) *Transient Phenomena in Electrical Machines*. Lecture notes for a course in electrical mashines. Göteborg: Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology.
- [7] Manitoba HVDC Research Centre. *Interfacing the machine model to EMTDC*. EMTDC V3 User's Manual. pp. 99-101.
- [8] Manitoba HVDC Research Centre. (1998) *EMTDC Manual: 3.0*. EMTDC V3 HTML Manual.
- [9] Micula, G. och Micula, S. (1999) *Handbook of Splines*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-5503.
- [10] Råde, L. and Westergren, B. (1990) *BETA Mathematical Handbook*. 2:nd edition. Lund: Studentlitteratur. ISBN 91-44-025052-54.
- [11] Strang, G. (1988) *Linear Algebra and its Applications*. 3:rd edition. Orlando, Florida: Harcourt Brace & Company. ISBN 0-15-551005-3.
- [12] Svensson, T. och Alaküla, M. (1991) *Elektriska Drivsystem* Göteborg: Institutionen för Elmaskinteknik och Krafftelektronik, Chalmers Tekniska Högskola.

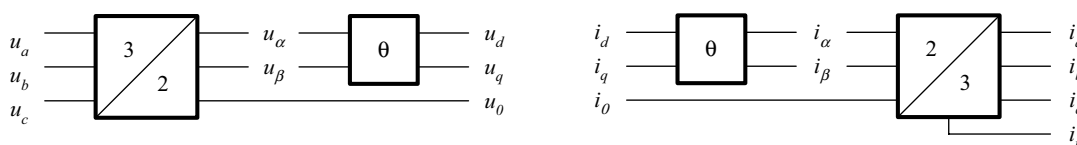
Bilaga A

Koordinattransformation

Genom att transformera det stationära trefassystemet till ett roterande tvåfassystem, sk Parktransformation, kommer växelstorheter att bli likstorheter, i stationärtillstånd [3].

En amplitudinvariant transformation medför att strömmar och spänningar kommer att vara beloppsriktiga. Transformationen sker från trefas abc till tvåfas $dq0$ med en komponent i längsled (direct-axis), en komponent i tvärlädd (quadrature-axis) samt en nollföljds-komponent (zero-sequence)[3]. Notera att nollföljds-komponenten inte roterar och därför ej heller behöver transformeras till det roterande koordinatsystemet. Transformationen förutsätter att statorlindningen är symmetriskt trefasig och sinusformigt utbredd, och omfattar därför inte lindningsdistortion.

Indexen abc refererar till det stationära trefassystemet liksom $\alpha\beta$ refereras till det stationära tvåfassystemet. Det roterande tvåfassystemet indexeras dq . Nollföljdsspänning och nollföljdsström betecknas med index 0, medan neutralströmmen i trefassystemet indexeras n .



(a) Transformation av spänningarna från stationärt abc till roterande $dq0$.

(b) Inverstransformation av strömmarna från roterande $dq0$ till stationärt abc .

Figur A.1: Parks koordinattransformation och dess invers.

I figur A.1(a) visas transformationen från stationär trefas och i figur A.1(b) visas den inversa transformationen från roterande tvåfas. Detta ger ekvationerna A.1 – A.2 för amplitudinvariant transformation.

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

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

Dess amplitudinvarianta inverstransform ges av ekvationerna A.3 – A.4.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Neutralströmmen ges av summan av alla fasströmmar:

$$i_n = i_a + i_b + i_c \quad (\text{A.5})$$

För de fall där neutralpunkten är ansluten tillåts en neutralström flyta och ekvation A.6 gäller:

$$i_n = 3i_0 \quad (\text{A.6})$$

Om däremot neutralpunkten är isolerad eller inte existerar gäller följande ekvation:

$$i_n = 0i_0 \quad (\text{A.7})$$

Bilaga B

Interpolering och kurvanpassning

För att återskapa en tomgångskurva kan exempelvis interpolering eller kurvanpassning väljas. Vilken metod som väljs beror på vilka villkor som ska uppfyllas. Utifrån den återskapade kurvan ska dels induktansen $L(i)$ kunna tas fram, dels dess derivata $\frac{dL(i)}{di}$. Med hänsyn tagen till prestandakrav kan det vara nödvändigt att kompromissa den återskapade kurvans följsamhet, till förmån för färre och mindre komplicerade beräkningar.

Gemensamt för de olika metoderna är, att koefficienterna vid simuleringsstarten beräknas utifrån angivna data. Därefter beräknas aktuellt polynom, med dess koefficienter, för varje tidssteg. Det är alltså polynomets komplexitet som styr simuleringsprestandan, mer än komplexiteten för beräkningen av koefficienterna.

För interpoleringen påverkas även komplexiteten av antalet mätpunkter. Detta på grund av att det skapas fler intervall och därmed fler polynom. För styckvis interpolering är det nödvändigt, att i varje tidssteg maska fram aktuellt intervall och tillhörande koefficienter. Genom att utnyttja det faktum, att induktansen i huvudsak kommer att ligga kring arbetspunkten och att strömmarna inte ändras i språng, går det dock att förbättra effektiviteten.

Kurvanpassningens komplexitet beror däremot endast av polynomets gradtal, då ett och samma polynom används för hela det uppmätta intervallet. Dock kan det bli aktuellt att skarva kurvanpassningen utanför det uppmätta intervallet, exempelvis med en linjär förlängning.

Ett fysikaliskt randvillkor är, att den återskapade kurvan skall vara monoton. Grunden för en monoton kurva ges här av att de inmatade noderna är monotona. För vissa metoder är detta dock ej tillräckligt, se nedan under respektive metod.

Nedan följer en redogörelse för fyra olika metoder att återskapa en tomgångskurva. I denna beaktas monotonicitet och algoritmernas komplexitet. Grafiska exempel på kurvor redovisas för $\psi(i)$, $L(i)$ samt $\frac{dL(i)}{di}$, enligt ekvationerna i avsnitt 3.2.2.

B.1 Kubisk Hermite-interpolation

Hermite-interpolering är en styckvis interpolation [4]. Polynomet, som beskriver kurvan i varje intervall, är kubiskt. Polynomet har som indata själva noden men även dess derivata. Genom ett val av monotont minskande flödesderivator eller monotont ökande induktansderivator, kan det monotona flödet återskapas. Dessa derivator kan antingen anges var för sig eller beräknas approximativt utifrån angivna noder.

Ett kubiskt polynom med, för varje intervall, unika koefficienter, ges av ekvation B.1 och tillhörande derivata, se ekvation B.2. I intervallet är angränsningsnoderna och dess derivata kända, vilket ger ett lösbart ekvationsystem, se ekvation B.3.

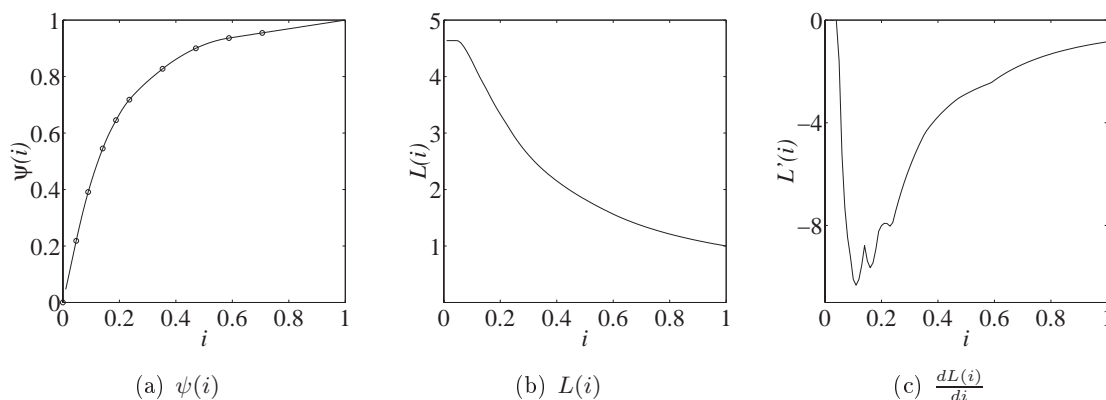
$$H(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{dH(x)}{dx} = \alpha_1 + 2\alpha_2 x + 3\alpha_3 x^2 \quad (\text{B.2})$$

$$\begin{bmatrix} H(x_k) \\ H(x_{k+1}) \\ H'(x_k) \\ H'(x_{k+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{k+} & x_{k+}^2 & x_{k+}^3 \\ 1 & x_{(k+1)-} & x_{(k+1)-}^2 & x_{(k+1)-}^3 \\ 0 & 1 & 2x_{k+} & 3x_{k+}^2 \\ 0 & 1 & 2x_{(k+1)-} & 3x_{(k+1)-}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Komplexiteten ligger i beräkandet, för varje tidssteg, av det kubiska polynomet. Koefficienterna är för denna metod fyra per delintervall.

Utifrån givna monotona data kan en återskapad flödes-, induktans- respektive derivatakurva se ut enligt figur B.1. Det framgår tydligt av derivatakurvan, att den inte är en C^2 -kurva¹. Detta



Figur B.1: Kubisk Hermite-interpolation av tomgångskurvan för en synkronmaskin.

är en följd av att kurvan har approximerade derivator. Denna metod ger en bra återskapad kurva, även för relativt få noder.

¹En C^n -funktion är en n -gånge derivierbar funktion.

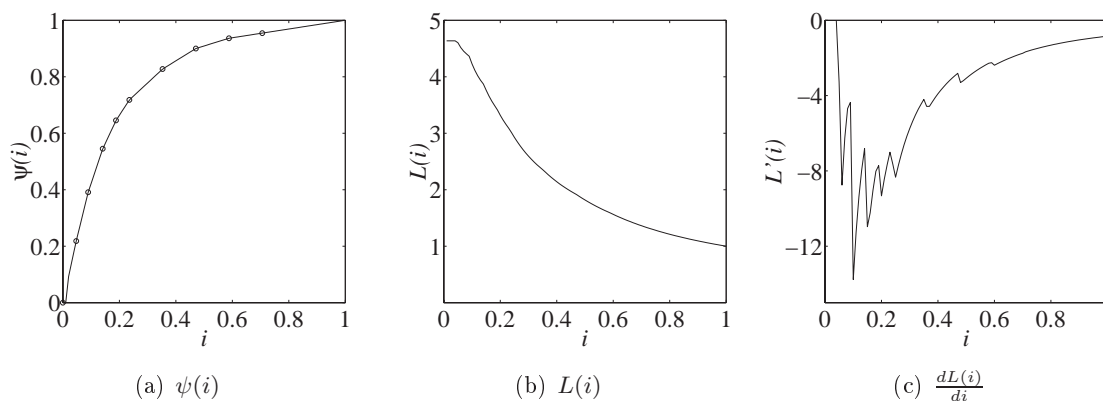
B.2 Linjär interpolation

Den linjära interpolationen är liksom Hermite-interpolering en styckvis interpolation. För monotona data kommer denna metod att ge en strikt monoton interpolation utan särskilda villkor, om kurvan interpoleras i IV -planet. Detta ger då kvoten, se ekvation 3.13, ett karaktäristiskt utseende. Varje nod i det mättade området förbinds med en parabel, en ”hängande kedja”. Det omvända gäller om interpolationen sker för kvoten, $L(i)$, vilket resulterar i motsvarande parabler i tomgångskurvan.

De koefficienter som behöver beräknas vid linjär interpolation, är endast riktningskoefficienten mellan noderna. Funktionen har formen enligt följande:

$$f(x) = a_k x + b_k \quad x = [x_{k-1}, x_k], \quad 1 \leq k \leq n, \quad k \in \mathbf{Z} \quad (\text{B.4})$$

Figur B.2 visar den linjära interpolationen av en tomgångskurva. Styckvis är det en C^1 -funktion, men i hela det interpolerade intervallet är det en C^0 -funktion. Detta ger att $\frac{dL(i)}{di}$



Figur B.2: Linjärinterpolation av tomgångskurvan för en synkronmaskin.

inte är kontinuerlig. Beräkningsmässigt är detta den enklaste approximationen för de metoder som tas upp här, både vad gäller koefficienter och polynom.

Om Hermite-interpolationen är för numeriskt krävande kan denna metod vara ett alternativ, dock på bekostnad av kurvans följsamhet. Linjär interpolation ger en grov approximation vid få noder men kan garanteras ge en monotont växande tomgångskurva.

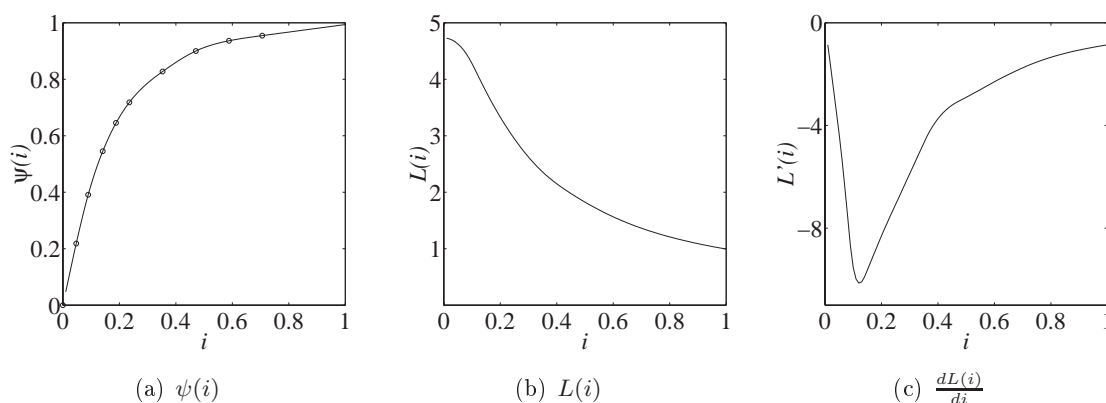
B.3 Kubisk Spline-interpolation

Den tredje varianten på interpolation med styckvisa polynom är Spline-interpolation [9]. Liksom vid Hermite-interpolation används här kubiska polynom. Tvärtemot Hermite specificeras inte derivatorna vid noderna. Spline tillåter i stället en kontinuerlig andraderivata. Detta ger att derivatan i noden, sett från båda håll, är densamma, se ekvation B.5. En Spline-interpolerad kurva blir på detta sett mycket följsam, då kurvan är en C^3 -funktion i hela intervallet. Detta innebär dock, att den interpolerade tomgångskurvan inte nödvändigtvis blir monoton.

$$\frac{ds(x_{j-})}{dx} = \frac{ds(x_{j+})}{dx} \quad (\text{B.5})$$

I intervallet $[a, b]$ med n noder ges ett ekvationssystem med $n+2$ obekanta. Dessa två obekanta elimineras genom att ange randvillkor. Ett alternativ till randvillkor är att ange start- och slutderivatorna, $\frac{ds(a_-)}{dx}$ och $\frac{ds(b_+)}{dx}$. Ett annat alternativ, om derivatorna inte är kända, kan vara att ange andraderivatorna. Om dessa sätts lika med noll kallas denna interpolation för naturlig kubisk Spline.

Spline-algoritmen utvecklas från andraderivatan, vilket ger att koefficienterna som beräknas är dels nodernas andraderivata, dels dubbla integrationskonstanter. Komplexiteten är jämförbar med Hermite, men denna metod kan ge mera följsamma kurvor, i synnerhet kurvan för derivatan, se figur B.3.



Figur B.3: Spline-interpolation av tomgångskurvan för en synkronmaskin.

Då det inte går att garantera monotona kurvor med denna metod, måste den återskapade kurvan granskas grafiskt. För tillämpning i denna modell blir det omständligt att genomföra praktiskt.

B.4 Polynomanpassning med minsta kvadratmetoden

I det kurvanpassade intervallet används ett och samma polynom, vilket förenklar algoritmen. Utanför det anpassade intervallet, i kurvans förlängning, bör dock anpassningen skarvas med ytterligare ett polynom. För att kurvanpassningen skall vara giltig krävs, att $L(i)$ skall vara detsamma som L_{md} samt att $\frac{dL(i)}{di} = 0$ i det omättade området. Ett förslag till polynom med monomial bas kan vara av typen:

$$p_n(t) = (a_1 + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \dots + a_n t^n) \quad (\text{B.6})$$

Detta saknar förstgradsterm och är av grad n . Om polynomet $\frac{1}{p_n(i)}$ ansätts för $L(i)$, ger detta derivatan, enligt ekvation:

$$\frac{dL(i)}{di} = -\frac{2a_2 i + 3a_3 i^2 + \dots + na_n i^{n-1}}{(a_1 + a_2 i^2 + a_3 i^3 + \dots + a_n i^n)^2} \quad (\text{B.7})$$

Med nollström insatt i ansatta polynom för induktansen och dess derivata, ger detta en giltig kurvanpassning från $i = 0$. Av flödesderivatan enligt ekvation 3.10 ges här ekvation B.9.

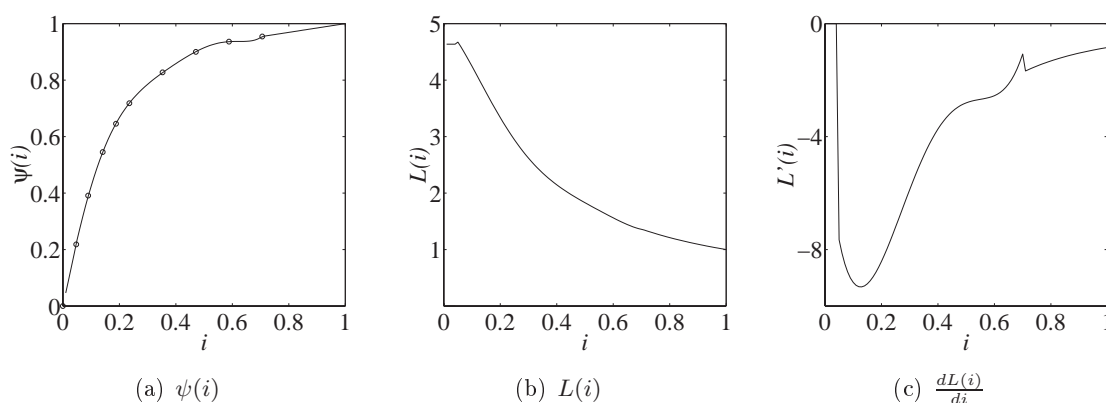
$$L(0) = \frac{1}{a_1} (= L_{md}) \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{d\psi(0)}{dt} = \left[\frac{dL(0)}{dt} 0 + L(0) \right] \frac{di}{dt} = 0 \quad (\text{B.9})$$

För att minska det interpolerade intervallet och därigenom få en bättre överensstämmelse, kan kurvan skarvas med en linjär approximation även för den omättade delen. Detta liksom skarvning i kurvans förlängning, medför språng i angränsningsnoden p för derivatan:

$$\frac{dL(p-)}{dt} \neq \frac{dL(p+)}{dt} \quad (\text{B.10})$$

Polynomet i det anpassade intervallet är däremot en C^n -funktion; detta ger en kontinuerlig derivata. Genom att lösa ut koefficienterna till polynomet med minsta kvadratmetoden jämnas små avvikelser ut [11], men i gengäld behövs relativt många mätpunkter för att få bra överensstämmelse med den ursprungliga kurvan. För att kurvanpassningen ska ha små residualer krävs en högre grad av polynomet. Utifrån m antal mätpunkter kan man välja ett polynom av graden $m - 1$, för att reducera residualerna till noll. Vid val av en hög grad blir dock polynomet mer komplext, och kurvan för höga värden på strömmen kommer att svänga kraftigare.



Figur B.4: Kurvanpassning av tomgångskurvan för en synkronmaskin.

I figur B.4(a), mellan näst sista och sista noden, ges exempel på icke monotont ökande flöde. Detta orsakade även numeriska problem vid verifieringarna av metoden. Språnget vid skarvning av kurvans förlängning, framgår av figur B.4(c).

Eftersom det inte enkelt går att säkerställa ett entydigt flöde bör denna metod därför verifieras grafiskt. Metoden kräver relativt hög grad på polynomet, för att ge en rimlig överensstämmelse med mättningskurvan. Den effektivitetsvinst som ett enda polynom över hela intervallet innebär, går därmed förlorad för en högre grad på polynomet.

För denna modell avråds användningen av kurvanpassning, dels på grund av komplexiteten vid beräkningen, dels på grund av behovet att grafiskt verifiera kurvanpassningen.

Bilaga C

Storheter i per unit

Synkronmaskinmodellens parametrar anges med storheter i per unit (*p.u.*) Modellen ger genom val även in- och utsignalerna moment respektive vinkelhastighet i per unit. Internt används endast reella värden varför angivna parametrar liksom in- och utsignaler i per unit skalas om. Storheterna normeras i per unit på det sätt som exemplifieras i ekvationerna nedan [2]:

$$S_{pu} = \frac{S}{S_b} \quad [p.u.]$$
$$T = T_{pu} T_b \quad [Nm]$$

Denna modell hanterar endast en uppsättning nominella storheter men två basstorheter. De nominella storheterna väljs som enfasbas i trefssystemet och en nominell storhet får då värdet 1.0 *p.u.* Med amplitudriktig transformation medför detta istället att toppvärdena av fasspänning och fasström motsvarar ström- respektive spänningsbasen i tvåfssystemen. I komponenten anges de tre nominella storheterna fasspänning, fasström respektive systemfrekvens, på formulärsidan *Basic Data*.

$$U_{fas} = U_b$$
$$I_{fas} = I_b$$
$$f_s = f_b$$

Ur dessa storheter definieras resterande basstorheter. I komponentens formulär anges resistanser och reaktanser i per unit. Notera att en reaktans ges samma värde i per unit som en induktans. Tröghetsmomentet H anges ej i *p.u.* utan i $\frac{MW_s}{MVA}$.

$$\begin{array}{lll} u_{2b} = \sqrt{2}U_b & i_{2b} = \sqrt{2}I_b & \omega_b = 2\pi f_b \\ S_b = 3U_b I_b & Z_b = \frac{U_b}{\sqrt{3}I_b} & L_b = Z_b \omega_b \\ \psi_{2b} = \frac{u_{2b}}{\omega_b} & T_b = p \frac{S_b}{\omega_b} & H = J \frac{\omega_b^2}{2S_b} \end{array}$$

För att kunna jämföra enfasströmmen med dq -strömmarna i simuleringarna har för dessa fall

samma normerande bas (I_b) använts. Detta medför att i_s är direkt jämförbar mot toppvärdet på fasströmmen.

Fältströmmen anges i förhållande till nominell fältström enligt $\frac{i_f^{nom}}{i_f}$ där i_f^{nom} ges för den fältström som ger nominell klämspänning i tomgångsprov¹. Observera att fältströmmen och spänningen inte är normerad² med I_b respektive U_b . Nominell fältspänning u_f^{nom} följer av fältspänningen vid i_f^{nom} .

¹Till skillnad från i Manitoba-modellen används inte normerad fältström i NEFI-modellen.

²I EMTDC kallas den normerade fältströmmen för *per unit field current*.

Bilaga D

Maskin- och systemparametrar

En 5 kVA motor väljs som simuleringsmodell. Märkdata och parametrar kommer från den maskin Alaküla har använt i sin licentiatavhandling [1]. Maskinens märkdata väljs som systembas för per unit-beräkningar med undantag av spänningen. Som spänningsbas väljs dock i stället fasspänningen u_f , se tabell D.1.

Märkeffekt	S_N	5.0	[kVA]	1.0	[p.u.]
Märkspänning	U_N	220.0	[V]	$\sqrt{3}$	[p.u.]
Märkfrekvens	f_N	50.0	[Hz]	1.0	[p.u.]
Tröghetsmoment	J	0.058	[kgm ²]	0.5724	$[\frac{MVs}{MVA}]$
Polpar	p	2			
Lindningsomsättning	$\frac{n_f}{n_{\alpha\beta}}$	12			

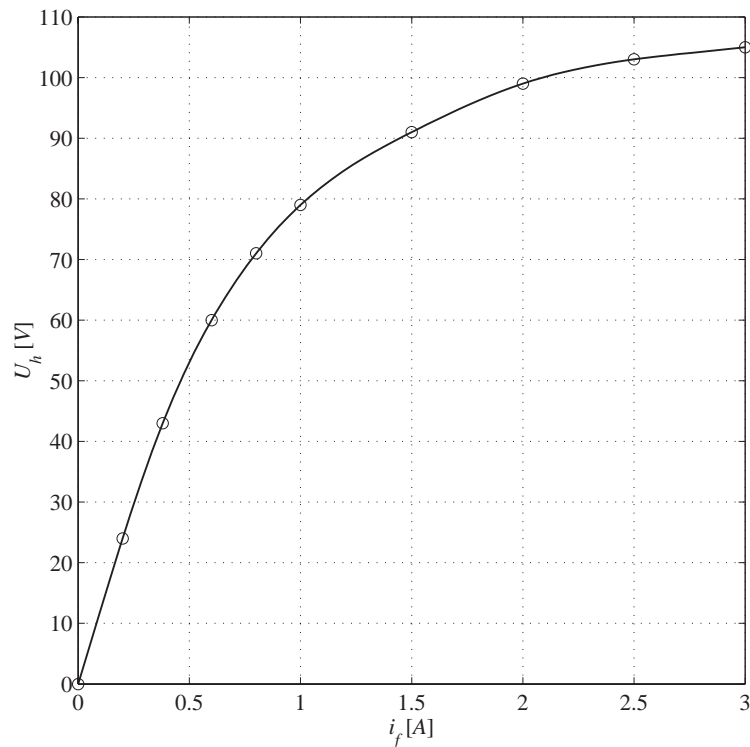
Tabell D.1: Märkdata för en 4-polig synkronmaskin.

Maskinens parametrar i dq -planet framgår av tabell D.2. För att jämföra den mekaniska vinkelhastigheten ω och det elektriska momentet T_{el} modellerna emellan, kommer dock $p = 1$ att användas. Märk väl, att för märkmomentet T_N , vilket definieras ur märkeffekten S_N , kommer P_{in} att vara större än P_N . Detta medför att för märklast kommer $S > 1.0$ p.u., då även förlusterna tillkommer.

Omättade induktanser			Resistanser					
L_{md}	0.0230	[H]	$L_{Q\sigma}$	0.0020	[H]	R_s	0.54	[Ω]
$L_{f\sigma}$	0.0043	[H]	L_{mq}	0.0190	[H]	R_f	0.23	[Ω]
$L_{D\sigma}$	0.0016	[H]	$L_{s\sigma}$	0.0016	[H]	R_D	0.29	[Ω]
						R_Q	0.54	[Ω]

Tabell D.2: Maskinparametrarna som används i simuleringarna.

Mättningskaraktäristiken ges av maskinens tomgångskurva se figur D.1. Den är avläst och återskapad från maskinens uppmätta tomgångskurva [1]. De avlästa noderna återges med markeringar längs kurvan. Noderna har använts som mättningskaraktäristik, för maskinmodellerna i EMTDC, i simuleringarna med mättad magnetiseringsinduktans. De avlästa noderna har räknats om till per unit vid införandet i maskinmodellerna. Kurvan visar uppmätt RMS-spänning mellan klämmorna $a - c$ vid maskinens halva nominella frekvens (25 Hz).



Figur D.1: Tomgångskurvan för en synkronmaskin. Kurvan är uppmätt vid maskinens halva nominella frekvens (25 Hz). Markeringarna är de avlästa värdena ur Alakülas tomgångskurva[1].

Ovanstående tomgångskurva kommer från en laborationsmaskin där mättning särskilt studerats och kan därför inte anses representera en normalt mättad maskin. I denna maskin motsvaras mättningen vid tomgång av knappt en faktor fem (den mättade induktansen motsvarar knappt en femtedel av den omättade induktansen). Däremot är det gynnsamt för verifiering av mättningen i modellen, då den kraftiga mättningen ger stor påverkan på strömberoendet i modellen. I en mer normalt mättad maskin sjunker den mättade induktansen, i storleksordningen, med ca. 10-15 %.

Bilaga E

Terminering av Manitoba-modellen

I EMTDC beräknas spänningen i en elektrisk nod (med enbart strömkällor anslutna) genom att först summera all ström och sedan, ur nätets konduktansmatris, beräkna spänningen. Nodens spänning vid t_k beror här av strömmen vid t_{k-1} . För stora tidssteg och/eller stora strömderivator i noderna kan detta ge upphov till problem.

Manitoba-modellen, och även NEFI-modellen, fungerar elektriskt som en strömkälla. Spänningen i noden (ex. en klämman på maskinmodellen) är modellens insignal och resulterar i en ström som injiceras i noden. För en relativt stabil spänning kan detta ses som en sluten krets. För en strömspik eller ett strömsteg i ett svagt nät, får modellen däremot karaktären av en öppen krets. I och med att strömmen i noden inte går in i maskinen, ingår endast nätets konduktans i spänningsberäkningen. Detta leder till en felaktig spänning och maskinen svarar därför med en felaktig ström. Fortgår detta leder det i sin tur till instabilitet.

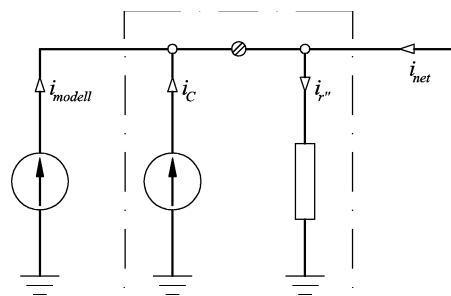
Genom att minska på stegländan vid simuleringarna, minskar problemet, men anses inte i Manitoba-modellen vara tillräckligt. Genom att inkludera en del av maskinens impedans i nätets konduktansmatris "känner" EMTDC av maskinen även vid snabba spänningsförändringar[7]. I Manitoba-modellen är därför klämmorna på modellen terminerade¹.

Termineringen är utförd med modellens karakteristiska impedans, vilken här definieras som modellens subtransienta induktans L_d'' . Representationen av den subtransienta induktansen ges här av en resistor i parallell med en strömkälla, se figur E.1. Detta leder till att strömmen i noden även fördelar sig till maskinmodellen, under ett och samma tidssteg. I nästa tidssteg injekterar modellen den ström som spänningen ger upphov till samt kompenserar strömmen som gick genom resistorn med hjälp av den extra strömkällan.

$$r'' = 2 \frac{L_d''}{\Delta t}$$
$$i_c(t) = \frac{V_c(t - \Delta t)}{r''}$$

Detta leder till ett visst strömfel då strömmen genom den karakteristiska reaktansen kompenseras först nästa tidssteg. Från nätet sett kommer därför den terminerade Manitoba-modellen att skilja sig från NEFI-modellen.

¹Termineringen är ej verifierad i NEFI-modellen ver. 1.0



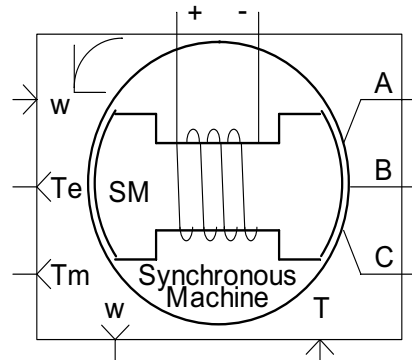
Figur E.1: Termineringen vid en anslutningsklämma för Manitoba-modellen.

Bilaga F

Help file for the NEFI-model

Synchronous Machine Model

ver. 1.0



Description

This component models a synchronous machine. Internally it is modeled in a rotating two-phase system (d-q) where the motor sign convention is in use. The machine has three options for terminal connections: Each winding separately connected (six terminals $AaBbCc$), wye connected with isolated neutral (three phase terminals ABC) or wye connected with neutral (three phase terminals and one neutral terminal $ABC-N$). The exciter connects to an electrical circuit via two electrical nodes. For excitation, it is necessary to apply a voltage between these two terminals, observe that it is an electrical connection, not a signal. Supplying a value to T_m , mechanical torque, may control the component.

A multi-mass component could also be connected to the machine for simulations of external masses. If the multi-mass component has generator sign convention, the machine has a possibility to switch the convention externally for the torque. If a multi-mass component is connected into the machine, supplying a positive value w has to control it. In this case, applied torque will be transferred to the multi-mass component.

This model has options to model one or two damper windings in the q-axis and saturation in d-axis mutual reactance. For initialisation and start-up, the model can disable mechanical speed differential equations, e.g. lock its rotor speed. This can be done until the user are satisfied with system stability and then release it to free running.

At all electrical nodes, voltage is in [kV] and current in [kA]. Torque can be either in [p.u.] or in [Nm] and mechanical rotor speed can be either in [p.u.] or in [rad/s]. Despite the motor sign convention, the machine could be used in a multi-mass system with generator sign convention. The model can externally change its sign convention.

- T_e – electrical torque
- T_m – output mechanical torque
- T – input mechanical torque
- w – output (input) mechanical rotor speed

The Synchronous Machine Model uses the **U_SM0** subroutine. Be sure that a valid file reference to the source file is included in the project before running simulations.

Dialog Parameters

Configuration:

- **Machine Name:** The name of this component.
- **Pole Pairs:** Number of pole pairs in the rotor. This number affects mechanical angular frequency.
- **Turns Ratio:** $n:1$. The internal values of the field current and voltage are referred to the stator winding. These values are scaled from the field current and voltage measured at the terminal of the field winding. The turns ratio between the field and the stator windings scale the parameters from field to stator winding, e.g. the field winding impedance as: $Z'_f = n^2 Z_f$. Turns Ratio of 1 is equal to 1:1.
- **Number of q-Axis Damper Windings:** *One* or *Two*.
- **Multi-Mass Interface:** *Enable* or *Disable*. This option allows speed control with a multi mass system. “Enable” will add an input signal ω at the component, in either [rad/s] or [p.u.].
- **Saturation in d-Axis:** *Enable* or *Disable*. With this option enabled, the model will be non-linear in d-axis. In that case the upper left icon at the component switch from a linear graph to a non-linear graph, see the figure in the beginning. Saturation characteristics apply under dialog *Saturation*.
- **Type of Neutral:** *Isolated*, *To Terminal* or *None*. The stator windings could be either wye connected with isolated neutral (*Isolated*: Three phase terminals ABC), wye connected to a neutral terminal (*To Terminal*: Three phase terminals and one neutral terminal ABC-N) or each winding separately connected (*None*: Six terminals AaBbCc).

Basic Data:

- **RMS Phase-to-Ground Voltage:** Rated RMS phase voltage in [kV]. Machine base used for per unit calculations.
- **RMS Phase Current:** Rated line current in [kA] $I_b = S_b / (3 * V_b)$. Machine base used for per unit calculations.
- **Base Frequency:** System frequency in [Hz]. Machine base used for per unit calculations.
- **Moment of Inertia:** The machines stored moving energy [MWs/MVA]. Greyed out if *Multi-Mass* is disabled.

Equivalent Circuit:

Parameters based on equivalent circuit for a d - q system. Enter unsaturated machine data for the linear model in [p.u.].

- **Stator Resistance:** The armature resistance in both d- and q-axis. This resistance is also used as zero-sequence resistance.
- **Unsaturated Magnetising Reactance in d-Axis:**
- **Magnetising Reactance in q-Axis:**
- **Stator Leakage Reactance:** This is the leakage reactance in both d- and q-axis. This reactance is also used as zero-sequence reactance.

- **Field Resistance:** If a *Turns Ratio* defined other than 1:1 this is referred to the stator winding.
- **Field Leakage Reactance:** If a *Turns Ratio* defined other than 1:1 this is referred to the stator winding.
- **Damper Resistance d-axis:**
- **Damper Leakage Reactance d-axis:**
- **Damper 1 Resistance q-axis:**
- **Damper 1 Leakage Reactance q-axis:**
- **Damper 2 Resistance q-axis:** Only active if *two damper windings* is selected.
- **Damper 2 Leakage Reactance q-axis:** Only active if *two damper windings* is selected.

Initial Conditions:

These initialise the state space vector. Useful when steady state is hard to reach. All currents specify in Amperes.

- **Machine Speed:** Initial machine speed in [rpm]. The machine will start at this speed and will run at this speed when *Locked Rotor* is enabled independent of applied torque. Note that the speed depends on the number of pole pairs and the frequency.
- **Rotor Angle:** Initial electrical position of rotor in [rad]. Typical between 0 and $2*\pi$ if the machine has one pole pair.
- **Armature Current in d-axis:**
- **Armature Current in q-axis:**
- **Field Current:** The internal initial field current referred to the stator winding.
- **Current in d-axis Damper Winding:**
- **Current in q-axis Damper Winding 1:**
- **Current in q-axis Damper Winding 2:** Greyed out if *one damper winding* is selected.
- **Zero-Sequence Current:**

Saturation:

- **X1-X15, Y1-Y15:** The saturation characteristics for the saturated magnetising reactance in d-axis. The format is to specify the current-voltage characteristics in points (I, V_{pu}). The characteristics always pass through (0,0) which is shown at the top of the list. It isn't possible to change and therefore greyed out. The first point (X1, Y1) should be at the unsaturated part or where saturation commence. All nodes must be monotonically increasing. If less than 15 nodes are available, enter a non-monotonic node like (0,0).

The saturation characteristic is interpolated with Hermite cubic interpolation. The Hermite coefficients are then stored in the STORF-vector. The interpolated curve is linear at the first and the last parts as well as the extension (after the last node). The magnetising reactance depends on the degree of the saturation and the unsaturated magnetising reactance. The voltage scale is entered in [p.u.] and the current scale in any unit.

Interface to Machine Controllers:

- **Locked Rotor Speed (Variable Name):** [1] – free running rotor or [0] – rotor locked at initial speed. Enter either via a variable name or direct in the field. Enabled when *Multi-Mass Interface* is not selected.
- **Torque unit:** [p.u.] or [Nm]. This affects both input and output torque as well as electrical and mechanical.
- **Speed unit:** [p.u.] or [Nm]. This affects both input and output speed.
- **External Sign convention:** *Motor* or *Generator*. If the multi-mass component use generator sign convention it is possible externally switch the convention for the torque (both input and output).

Internal Output Variables:

- **Rotor Angle (electrical):** $[0, 2\pi \cdot p]$ As a saw tooth wave. The electrically closed loop corresponds to 2π times pole pairs in radians.
- **Rotor Angle (mechanical):** $[0, 2\pi]$ As a saw tooth wave. The mechanically closed loop corresponds to 2π in radians.
- **Load Angle:** $[-\pi, \pi]$ A positive value corresponds to motor load. Measured in radians

Monitoring Internal STOR Vector:

The subroutine uses a storage vector for internal storage. All STOR locations are accessible (READ) and there are nine positions for monitoring. Enter an offset to actual STOR position NEXC and name it as a variable.

Bilaga G

The **STOR**-vector in the **NEFI**-model

STOR (NEXC+##)	VARIABLE	DESCRIPTION	unit
State Space vector			
1	isd	Stator winding current in d-axis	<i>A</i>
2	iff	Field winding current	<i>A</i>
3	iD	Damper winding current in d-axis	<i>A</i>
4	iQ1	1st Damper winding current in q-axis	<i>A</i>
5	iQ2	2nd Damper winding current in q-axis	<i>A</i>
6	isq	Stator winding current in q-axis	<i>A</i>
7	i0	Zero-sequence current	<i>A</i>
8-10		<i>Spare location</i>	
11	w	Electric speed of rotor	<i>rad/s</i>
12	theta	Electric position of rotor	<i>rad</i>
13-20		<i>Spare location</i>	
Input Signals			
21	ua	Phase voltage	<i>kV</i>
22	ub	-"	<i>kV</i>
23	uc	-"	<i>kV</i>
24	uf_prim	Field voltage between terminals	<i>kV</i>
25		<i>Spare location</i>	
26	T	Load Torque	<i>Nm</i>
27	wL	Input speed in case of external mass model	<i>rad/s</i>
27-30		<i>Spare location</i>	
31	usd	Voltage in d-axis	<i>V</i>
32	usq	Voltage in q-axis	<i>V</i>
33	u0	Zero-sequence voltage	<i>V</i>
34	uf	Field voltage between terminals, referred to stator winding	<i>V</i>
36-40		<i>Spare location</i>	
Machine Parameters			
41	Lmd	Mutal inductance in d-axis	<i>H</i>
42	Lmq	Mutal inductance in q-axis	<i>H</i>
43	Lso	Stator winding leakage inductance	<i>H</i>
44	Lfo	Field winding leakage inductance	<i>H</i>
45	LDo	Damper winding leakage inductance d-axis	<i>H</i>
46	LQ1o	1st Damper winding leakage inductance q-axis	<i>H</i>
47	LQ2o	2nd Damper winding leakage inductance q-axis	<i>H</i>
48-50		<i>Spare location</i>	
51	Rs	Armature resistance	Ω
52	Rf	Field resistance	Ω
53	RD	Damper winding resistance in d-axis	Ω
54	RQ1	1st Damper winding resistance in q-axis	Ω
55	RQ2	2nd Damper winding resistance in q-axis	Ω
56-60		<i>Spare location</i>	
61	J	Moment of inertia	<i>kgm²</i>
62-70		<i>Spare location</i>	

STOR (NEXC+###)	VARIABLE	DESCRIPTION	unit
Machine Configurations			
71	DAMPQ	Nr of damper windings in q-axis (1 or 2)	
72	p	Pole pairs	
73	NaNs	Turns ratio $n_f/n_{a\beta}$	
74	NEUTRAL	Machine neutral extended to an electrical node [0,1,3]	
75	SAT	Saturation, 0 = DISABLE, 1 = ENABLE	
76	MMASS	Mass interface, 0 = Internal, 1 = External (Multimass)	
77	LOOK_ROTOR	Looked rotor speed, 0 = TRUE, 1 = FALSE (normal)	
78-80		<i>Spare location</i>	
Output Signals			
81	Te	Electric Torque	Nm
82	Tm	Mechanical Torque, $T_e - J/P * dw/dt$	Nm
83	wm	Mechanical rotor speed	rad/s
84	thetam	Mechanical rotor position	rad
85	Pout	$T_e * w$	MW
86	Pin	$3UI * \cos\phi_i$, ($3/2(us * is)$)	MW
87	Qin	$3UI * \sin\phi_i$	MVA
88	delta	Load angle	rad
89	phi	$\text{atan}(Q/P)$	rad
90	cosphi	cosphi	
91	ia	Phase current	kA
92	ib	-"	kA
93	ic	-"	kA
94	in	Neutral current	kA
95	if	Field current	kA
96	ef	Excitation voltage	V
97-100		<i>Spare location</i>	
Initial Conditions, t=0			
101	isd0	Current in d-axis	A
102	if0	Field current	A
103	id0	Damper winding current in d-axis	A
104	iQ10	Damper winding 1 current in q-axis	A
105	iQ20	Damper winding 2 current in q-axis	A
106	isq0	Current in q-axis	A
107	iso0	Zero sequence current	A
108-110		<i>Spare location</i>	
111	w0	Initial rotor speed (electric)	rad/s
112	theta0	Position of rotor at start (electric)	rad
113-120		<i>Spare location</i>	
System Parameters			
121	U_BASE	Line RMS voltage base in kV	kV
122	I_BASE	Line RMS current base in kA	kA
123	w_BASE	Nominal speed	rad/s
124	R_BASE	Base resistance	W
125	L_BASE	Base inductance	H
126	if_BASE	Base field current	A
127	T_BASE	Torque base	Nm
128-140		<i>Spare location</i>	

STOR (NEXC+##)	VARIABLE	DESCRIPTION	unit
Flux Linkage			
141	fluxsd	Main flux space vector in d-direction	V_s
142	fluxsq	Main flux space vector in q-direction	V_s
143	fluxf	Field flux space vector in d-direction	V_s
144	fluxD	Damper winding flux in d-direction	V_s
145	fluxQ1	1st Damper winding flux in q-direction	V_s
146	fluxQ2	2nd Damper winding flux in q-direction	V_s
147	fluxad	Airgap flux in d-direction	V_s
148	fluxaq	Airgap flux in d-direction	V_s
149	deltas	Main flux angle	rad
150	deltaa	Airgap flux angle	rad
151-159		Spare location	
Saturation, B-H curve			
160	DSATX0	Origo	0
161	DSATX1	First H-point at an unsaturated part	any
162	DSATX2	Second ...	any
163	DSATX3	...	any
164	DSATX4		any
165	DSATX5		any
166	DSATX6		any
167	DSATX7		any
168	DSATX8		any
169	DSATX9		any
170	DSATX10		any
171	DSATX11		any
172	DSATX12		any
173	DSATX13		any
174	DSATX14		any
175	DSATX15		any
176		Spare location	
177		Spare location	
178		Spare location	
179		Spare location	
180	DSATY0	Origo	0
181	DSATY1	First B-point at an unsaturated part	p.u.
182	DSATY2	Second ...	p.u.
183	DSATY3	...	p.u.
184	DSATY4		p.u.
185	DSATY5		p.u.
186	DSATY6		p.u.
187	DSATY7		p.u.
188	DSATY8		p.u.
189	DSATY9		p.u.
190	DSATY10		p.u.
191	DSATY11		p.u.
192	DSATY12		p.u.
193	DSATY13		p.u.
194	DSATY14		p.u.
195	DSATY15		p.u.
196		Spare location	
197		Spare location	
198	K	Actual interval, last current value between node k>c>k-1	
199	N	Number of nodes	

Bilaga H

The STORF-vector in the NEFI-model

		STORF (NEXC+##)		coefficients			
				α_0	α_1	α_2	α_3
		x	x+1	x+2	x+3	x+4	x+5
Interval	1	0	-	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}
	2	5	-	α_{20}	α_{21}	α_{22}	α_{23}
	3	10	-	α_{30}	α_{31}	α_{32}	α_{33}
	4	15	-	α_{40}	α_{41}	α_{42}	α_{43}
	5	20	-	α_{50}	α_{51}	α_{52}	α_{53}
	6	25	-	α_{60}	α_{61}	α_{62}	α_{63}
	7	30	-	α_{70}	α_{71}	α_{72}	α_{73}
	8	35	-	α_{80}	α_{81}	α_{82}	α_{83}
	9	40	-	α_{90}	α_{91}	α_{92}	α_{93}
	10	45	-	α_{100}	α_{101}	α_{102}	α_{103}
	11	50	-	α_{110}	α_{111}	α_{112}	α_{113}
	12	55	-	α_{120}	α_{121}	α_{122}	α_{123}
	13	60	-	α_{130}	α_{131}	α_{132}	α_{133}
	14	65	-	α_{140}	α_{141}	α_{142}	α_{143}
	15	70	-	α_{150}	α_{151}	α_{152}	α_{153}

