

MODELLERING OCH SIMULERING AV  
SYNKRONGENERATOR DYNAMIK

ROLF OLSSON

INSTITUTIONEN FÖR REGLERTEKNIK  
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA  
JUNI 1980

Organization <b>LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY</b> Department of Automatic Control Box 725 S-220 07 LUND 7 Sweden		Document name Master Thesis	
		Date of issue June 1980	
		CODEN: LUTFD2/(TFRT-5234)/0-053/(1980)	
Author(s) Rolf Olsson		Sponsoring organization	
Title and subtitle Modellering och Simulering av Synkrongeneratorodynamik (Modelling and Simulation of Synchronous Generator Dynamics)			
		A4	A5
Abstract A number of simple synchronous machine models have been written in the simulation language SIMNON. The intention has been to find a set of models, which reflect physical properties and by conversion routines transfer these to Park form or vice-versa. Three different models are presented. Also the methods for determination of the parameters are presented. Simulation studies on one module show the dynamic behavior of certain step-changes in torque and magnetization.			
Key words		A4	A5
Classification system and/or index terms (if any)			
Supplementary bibliographical information			Language Swedish
ISSN and key title			ISBN
Recipient's notes		Number of pages 53	Price
		Security classification	
Distribution by (name and address)			

DOKUMENTDATABLAD enl SIS 61 41 21

## Beteckningar

I detta examensarbete förekommande beteckningar och vad de representerar.

R	- Resistans
L	- Induktans
X	- Reaktans
Z	- Impedans
I	- Strömstyrka
U, V	- Spänning
a, b, c	- a, b resp. c-fasen (i ett trefasssystem)
$\lambda$	- Magnetiskt flöde
$\varphi$	- Rotorvinkel
$\omega$	- Vinkelfrekvens
$\omega_0$	- Synkrona vinkelfrekvensen
$\delta$	- Lastvinkel
i	- Momentan strömstyrka
v	- Momentan spänning
P	- Aktiv effekt
Q	- Reaktiv effekt
T	- Vridmoment
H	- Tröghetsmoment

## Innehåll:

	<u>sid:</u>	
Kap 1	Inledning	1
Kap 2	Maskinekvivalenter	2
2.1	Synkronmaskinens uppbyggnad	2
2.2	Maskinens induktanser	3
2.3	Uppställning av maskinekvationer	4
2.4	Modell 1 (1 rotorlindning)	7
2.5	Modell 2 (2 rotorlindningar)	8
2.6	Modell 3 (3 rotorlindningar)	9
2.7	Nätmodeller	10
2.7.1	Nätmodell 1	10
2.7.2	Nätmodell 2	11
Kap 3	Parameterbestämning	12
3.1	Kortslutningsprov	12
3.2	Tomgångsprov	13
3.3	Bestämning av $X_d$	14
3.4	Eftersläpningsprov	15
3.5	Bestämning av $X_q$	15
3.5.1	Maximum Lagging Current Test	16
3.6	Mätningar av reaktanser och tidskonstanter hänfödda till transienta förlopp	16
3.6.1	Bestämning av $X_d'$ och $X_d''$	17
3.6.2	"-" $T_d'$ och $T_d''$	17
3.7	Direkt bestämning av $X_d''$ och $X_q''$	18
3.8	Alternativt sätt att mäta och bestämma synkr.maskinparametrar	19
3.8.1	D-axelparametrar	19
3.8.2	Q-axelparametrar	20
Kap 4	Parameterkonvertering	21
4.1	Förutsättningar	21
4.2	Ekvationsunderlag	21
Kap 5	Simuleringsmodeller	23
5.1	Modell A	24
5.2	Modell B	27
5.3	Modell C	28

Appendix I	SIMNON-listningar	
	Modell A	30
	Modell B	33
	Modell C	36
Appendix II	Konverteringsrutiner	38
-"-	III Simuleringar	41
-"-	IV Referenser	49

## 1 INLEDNING

Dynamiken hos generatorer i samband med kraftproduktion har länge varit av stort intresse. Med hjälp av moderna simuleringsmetoder kan totaldynamiken hos kraftproduktionsanläggningar studeras och däri ingår bl.a. kännedom om generatorernas dynamiska egenskaper. Detta examensarbete har initierats av SYDKRAFT AB och målsättningen har bl.a. varit, att från grundekvationernas samband bestämma fysikaliska modeller av synkronmaskiner i transienta tillstånd. Tonvikten har lagts på applikation av några enkla fysikaliska modeller och en matematisk transformation mellan dessa och Park's modellrepresentation. Vidare har avsikten varit att försöka koppla ihop de transienta och statiska prov som kan genomföras på en synkronmaskin med den matematiska modell som representeras.

Avsikten med detta examensarbete har således varit att från matematiska samband producera en användbar simulatorform och koppla denna till en parametrisk beskrivning samt till de praktiska metoder som finns för parameterbestämning.

Tillämpning av simulatormodellerna förutses dels för studier av generatorer i horisontalaxlade vindkraftaggregat och dels för studier av generatorer i vattenkraftstationer.

En fortsättning på detta examensarbete är dels identifiering mha mätdata från praktiska experiment dels simulerings-tekniska studier där transientbeteende hos någon kraftproduktionsanläggning studeras i detalj.

## 2 MASKINEKVIVALENTER

I nedanstående kapitel förklaras hur synkronmaskinen är uppbyggd och de ekvationer som beskriver maskinen tas fram. Dessa transformeras om m.h.a. Park's transformation till en ny uppsättning enklare ekvationer. Tre olika modeller som härör från dessa Park's ekvationer plockas fram. Till sist beskrives två olika nätmodeller.

Materialet har i huvudsak hämtats från [2], [3], [5] och [6]

### 2.1 SYNKRONMASKINENS UPPBYGGNAD

Maskinen består av 3 identiska och symmetriskt utplacerade statorlindningar (a,b,c) plus en rotor- eller fältlindning (f). En verklig maskin kan dessutom vara försedd med dämplindningar (x,y), som är kortslutna ledningar i rotorytan.

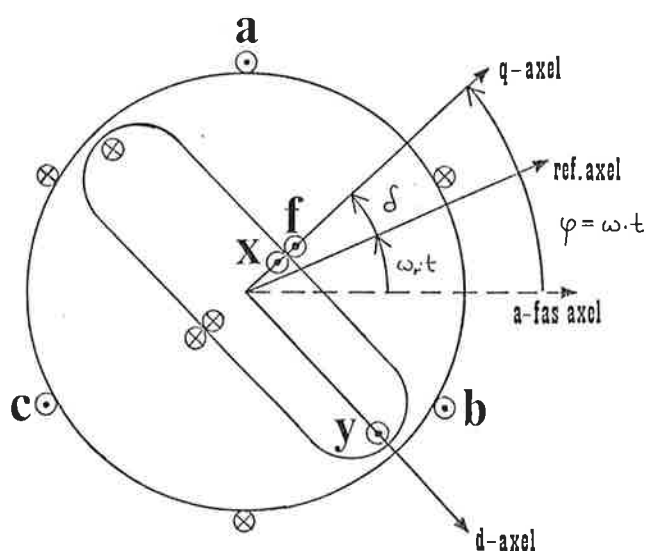


FIG. 2.1

## 2.2 MASKINENS INDUKTANSER

För att kunna beskriva maskinen i ekvationsform betraktar man maskinens lindningar som spolar vars själv- och ömsesidiga induktanser kan vara tidsberoende p.g.a. rotorns rotation. Graden av tidsberoende beror av rotorns rundhet, ju mer formen avviker från det cirkelrunda ju större tidsberoende.

Sex lindningar ger  $6 \cdot 6 = 36$  induktanser. För den som vill se hur dessa härledes hänvisas till [3] eller [6]

### Självinduktanser:

$L_{aa} = L_{aas} + L_{aam} \cos 2\varphi$	a-	a-lindningens självinduktans
$L_{bb} = L_{aas} + L_{aam} \cos(2\varphi + 120^\circ)$	b-	"-
$L_{cc} = L_{aas} + L_{aam} \cos(2\varphi - 120^\circ)$	c-	"-
$L_{ff} = \text{konstant}$	f-	"-
$L_{xx} = \text{konstant}$	x-	"-
$L_{yy} = \text{konstant}$	y-	"-

Här är  $L_{aas}$  = a's statiska induktans utan inverkan av rotor.

$L_{aam}$  = amplituden på a's tidsberoende induktans.

### Stator - stator induktanser:

$$L_{ab} = L_{ba} = -L_{abs} + L_{aam} \cos(2\varphi - 120^\circ)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -L_{abs} + L_{aam} \cos 2\varphi$$

$$L_{ac} = L_{ca} = -L_{abs} + L_{aam} \cos(2\varphi + 120^\circ)$$

Här är  $-L_{abs}$  den ömsesidiga induktansen mellan två statorlindningar utan hänsyn till rotorn. Observera att denna är negativ. Detta inses om man närmare studerar fig 2.1.



Stator - rotor induktanser:

$$\begin{aligned}
L_{af} = L_{fa} &= -L_{afm} \sin \varphi \\
L_{bf} = L_{fb} &= -L_{afm} \sin(\varphi - 120^\circ) \\
L_{cf} = L_{fc} &= -L_{afm} \sin(\varphi + 120^\circ) \\
L_{ax} = L_{xa} &= -L_{axm} \sin \varphi \\
L_{bx} = L_{xb} &= -L_{axm} \sin(\varphi - 120^\circ) \\
L_{cx} = L_{xc} &= -L_{axm} \sin(\varphi + 120^\circ) \\
L_{ay} = L_{ya} &= L_{aym} \cos \varphi \\
L_{by} = L_{yb} &= L_{aym} \cos(\varphi - 120^\circ) \\
L_{cy} = L_{yc} &= L_{aym} \cos(\varphi + 120^\circ)
\end{aligned}$$

Rotor - rotor induktanser:

$$\begin{aligned}
L_{xf} = L_{fx} &= \text{konstant} \\
L_{fy} = L_{yf} = L_{xy} = L_{yx} &= 0
\end{aligned}$$

$\varphi = \omega t$  alltså är  $\varphi$  tidsberoende. Detta medför att alla induktanser vars uttryck innehåller  $\varphi$  är tidsberoende.

2.3 UPPSTÄLLNING AV MASKINEKVATIONER

När vi ställer upp ekvationerna för maskinen antar vi att följande förutsättningar är uppfyllda:

- (i) Statorlindningarna är identiska och har samma resistans dvs  $R_a = R_b = R_c$ .
- (ii) Alla induktanser är oberoende av strömstyrkan, dvs magnetisk linjäritet råder.
- (iii) Luftgapsformen och utformningen av lindningarna är sådan, att alla induktanser kan anses vara en konstant plus en sinusformad funktion av den elektriska rotorns position  $\varphi$  eller  $2\varphi$ .
- (iv) Högre ordningens frekvenser ( $2\omega, 3\omega$  etc.) är försumbara.

För en ensam spole gäller:

$$v = R \cdot i + \frac{d}{dt} \lambda \quad \text{där } \lambda = L \cdot i$$

För vårt system med 6 spolar kan ekvationen skrivas i matrisform:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_f \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & & & & & \\ & -R_a & & & & \\ & & -R_a & & & \\ & & & R_f & & \\ & & & & R_x & \\ & & & & & R_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \\ \lambda_x \\ \lambda_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

där  $[\lambda] = [L] \cdot [i]$  med (1')

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & \dots & L_{ay} \\ L_{ba} & L_{bb} & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \\ L_{ya} & L_{yb} & \dots & L_{yy} \end{bmatrix}$$

Detta leder dock till mycket komplicerade ekvationer då både L och i är tidsberoende. Därför brukar man transformera om spänningar, strömmar och flöden till nya variabler enligt:

Park's transformation

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \\ v_f \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \sin \varphi & \frac{2}{3} \sin(\varphi - 120^\circ) & \frac{2}{3} \sin(\varphi + 120^\circ) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{3} \cos \varphi & \frac{2}{3} \cos(\varphi - 120^\circ) & \frac{2}{3} \cos(\varphi + 120^\circ) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_f \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

Kan skrivas mer komprimerat  $[v_{park}] = [T] \cdot [v]$

P.s.s gäller att:

$$[i_{park}] = [T] \cdot [i] \quad \text{och} \quad [\lambda_{park}] = [T] \cdot [\lambda]$$

Om man nu inför de nya konstanterna:

$$L_d = L_{aas} + L_{abs} + \frac{3}{2} \cdot L_{aam} \quad - \text{Direktaxel-induktans}$$

$$L_q = L_{aas} + L_{abs} - \frac{3}{2} \cdot L_{aam} \quad - \text{Tväraxel - "-}$$

$$L_o = L_{aas} - 2 L_{abs} \quad - \text{Nollsekvens "-}$$

så kan (1) och (1') skrivas (efter transformation):

$$\begin{aligned} v_d &= -R_a \cdot i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega \cdot \lambda_q \\ v_q &= -R_a \cdot i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega \cdot \lambda_d \\ v_o &= -R_a \cdot i_o + \frac{d}{dt} \lambda_o \\ v_f &= R_f \cdot i_f + \frac{d}{dt} \lambda_f \\ v_x &= R_x \cdot i_x + \frac{d}{dt} \lambda_x \\ v_y &= R_y \cdot i_y + \frac{d}{dt} \lambda_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + L_{afm} \cdot i_f + L_{axm} \cdot i_x$$

$$\lambda_q = -L_q \cdot i_q + L_{aym} \cdot i_y$$

$$\lambda_o = -L_o \cdot i_o$$

$$\lambda_f = -\frac{3}{2} \cdot L_{afm} \cdot i_d + L_{ff} \cdot i_f + L_{fx} \cdot i_x$$

$$\lambda_x = -\frac{3}{2} \cdot L_{axm} \cdot i_d + L_{fx} \cdot i_f + L_{xx} \cdot i_x$$

$$\lambda_y = -\frac{3}{2} \cdot L_{aym} \cdot i_q + L_{yy} \cdot i_y$$

(2')

Observera att här är  $\omega = \frac{d}{dt} \varphi$  den elektriska vinkelhastigheten.

$\omega = \frac{m}{2} \omega_s$  där  $m$  = antalet poler rotorn har och  $\omega_s$  = synkrona mekaniska vinkelhastigheten.

### Effekt och momentekvationer

Den momentant avgivna elektriska effekten är:

$$P_{el} = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c$$

Vilket i de nya variablerna blir:

$$P_{el} = \frac{3}{2} \cdot (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q + 2 \cdot v_o \cdot i_o)$$

Om nätet är symmetriskt, dvs att alla faserna belastas lika (vilket vanligtvis är fallet), blir  $i_o = 0$ , vilket medför att:

$$P_{el} = \frac{3}{2} \cdot (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (3)$$

Uttrycket för den reaktiva effekten är:

$$Q_{el} = \frac{3}{2} \cdot (v_q \cdot i_d + v_d \cdot i_q) \quad (4)$$

Upptaget vridmoment blir:

$$T_{el} = \frac{3}{2} \frac{m}{2} \cdot (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (5)$$

### Rotorns rörelseekvation (Swingekvationen)

Rotorn beskrivs av rörelseekvationen:

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_0} \dot{\omega} + K \cdot (\omega - \omega_0) = T_{mek} - T_{el} \quad (6)$$

Här är  $H$  = rotorns tröghetsmoment,  $K$  = dämpkonstant och  $T_{mek}$  = mekaniska inmomentet.

Dessutom är:

$$\omega = \omega_0 + \omega_r \quad \text{där } \omega_r = \frac{d}{dt} \delta \quad \text{vilket medför att:}$$

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega - \omega_0 \quad (7)$$

### 2.4 MODELL 1 (MED 1 ROTORLINDNING)

I denna enklaste modell bortser vi helt från dämplindningar. Rotorn förutsättes enbart ha en lindning, nämligen fältlindningen  $f$  som ligger på  $d$ -axeln. Modellens ekvivalenta elektriska schema visas i fig 2.2.a och 2.2.b.

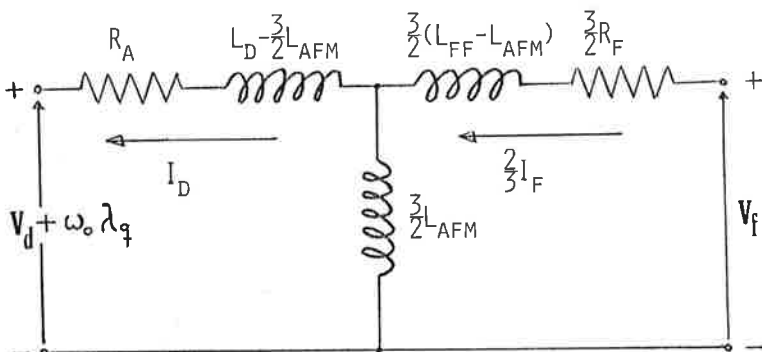


FIG. 2.2A

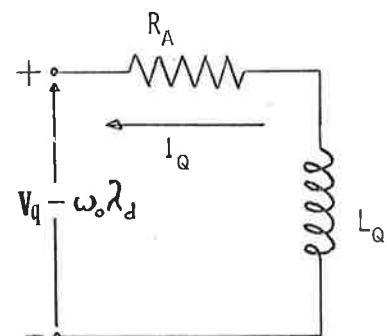


FIG. 2.2B

Ekvationerna (2) och (2') kan nu förkortas till:

$$v_d = -R_a \cdot i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega_o \cdot \lambda_q$$

$$v_q = -R_a \cdot i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega_o \cdot \lambda_d$$

$$v_f = R_f \cdot i_f + \frac{d}{dt} \lambda_f$$

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + L_{afm} \cdot i_f$$

$$\lambda_q = -L_q \cdot i_q$$

$$\lambda_f = -\frac{3}{2} \cdot L_{afm} \cdot i_d + L_{ff} \cdot i_f$$

Ekvationerna (3) - (7) blir oförändrade.

### 2.5 MODELL 2 (MED 2 ROTORLINDNINGAR)

Denna modell utgår, precis som modell 1, från Park's ekvationer. Rotorn beskrivs av en fältlindning f på d-axeln samt en dämplindning y på q-axeln. Modellens ekvivalenta schema är för d-axeln identiskt med modell 1. Vi har dock introducerat en ny lindning på q-axeln och dess ekvivalenta schema visas i fig 2.3.

Ekvationerna (2) och (2') blir för denna modell:

$$v_d = -R_a \cdot i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega_o \cdot \lambda_q$$

$$v_q = -R_a \cdot i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega_o \cdot \lambda_d$$

$$v_f = R_f \cdot i_f + \frac{d}{dt} \lambda_f$$

$$0 = R_y \cdot i_y + \frac{d}{dt} \lambda_y$$

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + L_{afm} \cdot i_f$$

$$\lambda_q = -L_q \cdot i_q + L_{aym} \cdot i_y$$

$$\lambda_f = -\frac{3}{2} \cdot L_{afm} \cdot i_d + L_{ff} \cdot i_f$$

$$\lambda_y = -\frac{3}{2} \cdot L_{aym} \cdot i_q + L_{yy} \cdot i_y$$

Observera att  $v_y = 0$  eftersom y-lindningen är kortsluten.

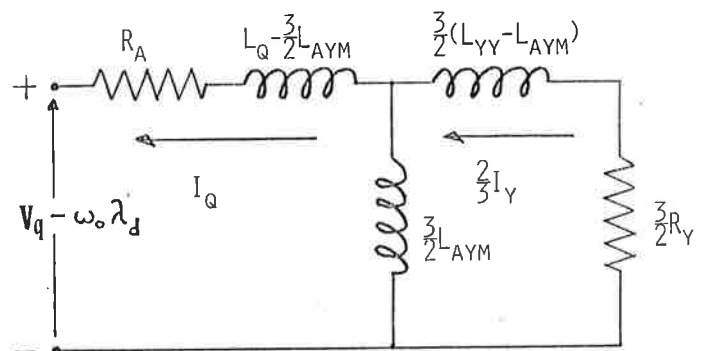


FIG. 2.3

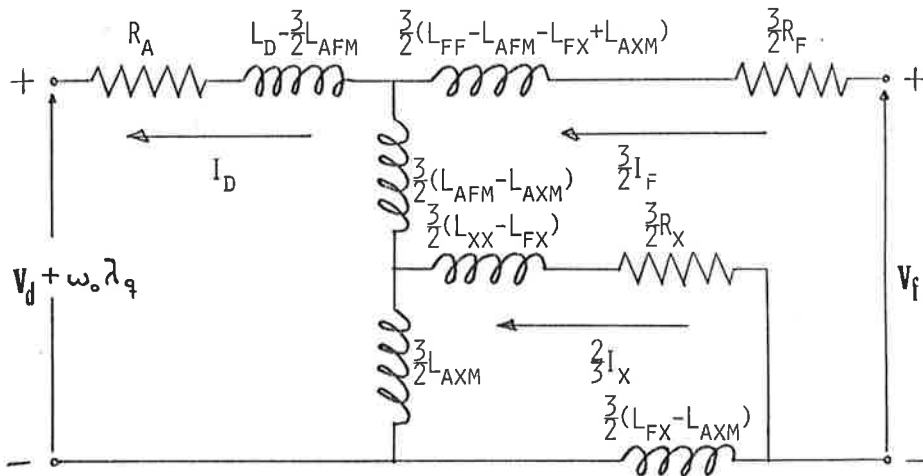


FIG. 2.4

### 2.6 MODELL 3 (MED 3 ROTORLINDNINGAR)

Denna modell utgår, liksom de bägge föregående, från Park's ekvationer. Rotorn beskrivs av en fältlindning  $f$  och en dämplindning  $x$  på  $d$ -axeln samt en dämplindning  $y$  på  $q$ -axeln. Modellens ekvivalenta schema är för  $q$ -axeln identiskt med modell 2. Vi har dock introducerats en ny lindning på  $d$ -axeln och dess ekvivalenta schema visas i fig 2.4.

Ekvationerna (2) och (2') blir för denna modell:

$$v_d = -R_a \cdot i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega_o \cdot \lambda_q$$

$$v_q = -R_a \cdot i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega_o \cdot \lambda_d$$

$$v_f = R_f \cdot i_f + \frac{d}{dt} \lambda_f$$

$$0 = R_x \cdot i_x + \frac{d}{dt} \lambda_x$$

$$0 = R_y \cdot i_y + \frac{d}{dt} \lambda_y$$

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + L_{afm} \cdot i_f + L_{axm} \cdot i_x$$

$$\lambda_q = -L_q \cdot i_q + L_{aym} \cdot i_y$$

$$\lambda_f = -\frac{3}{2} L_{afm} \cdot i_d + L_{ff} \cdot i_f + L_{fx} \cdot i_x$$

$$\lambda_x = -\frac{3}{2} L_{axm} \cdot i_d + L_{fx} \cdot i_f + L_{xx} \cdot i_x$$

$$\lambda_y = -\frac{3}{2} L_{aym} \cdot i_q + L_{yy} \cdot i_y$$

## 2.7 NÄTMODELLER

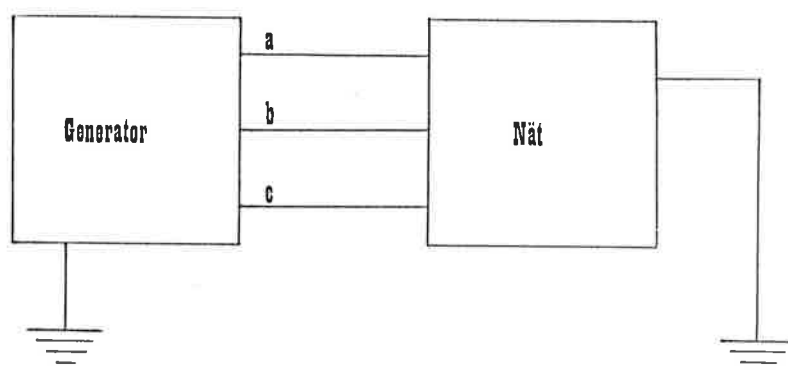


FIG. 2.5

För att generatorm ska kunna leverera någon effekt måste den anslutas till en belastning. I vårt fall antar vi att generatorm kopplas till ett starkt nät (se fig 2.6). Nätet kan approximativt beskrivas som en balanserad 3-fas Y-kopplad krets som har resistansen  $R_1$  och induktansen  $L_1$  (eller reaktansen  $X_1$ ) per fas. I fig 2.7 har en fas ritats ut.

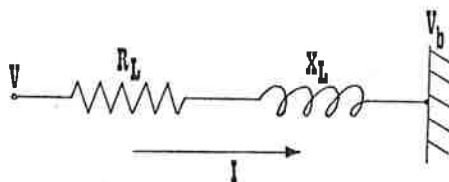


FIG. 2.6

### 2.7.1 NÄTMODELL 1

Med  $Z_1 = R_1 + jX_1$  där  $X_1 = \omega_0 L_1$  vet vi följande:

$$V = v_d + j \cdot v_q \quad V_b = v_b \cdot \sin \delta + j \cdot v_b \cdot \cos \delta \quad I = i_d + j \cdot i_q$$

Sambanden fås lätt ur fig 2.7 om man betraktar d-axeln som reella axeln och q-axeln som den imaginära axeln.

Ohm's lag ger:  $V - V_b = Z_1 \cdot I$  vilket är detsamma som:

$$\begin{aligned} v_d &= R_1 \cdot i_d - X_1 \cdot i_q + v_b \cdot \sin \delta \\ v_q &= R_1 \cdot i_q + X_1 \cdot i_d + v_b \cdot \cos \delta \end{aligned} \quad (8)$$

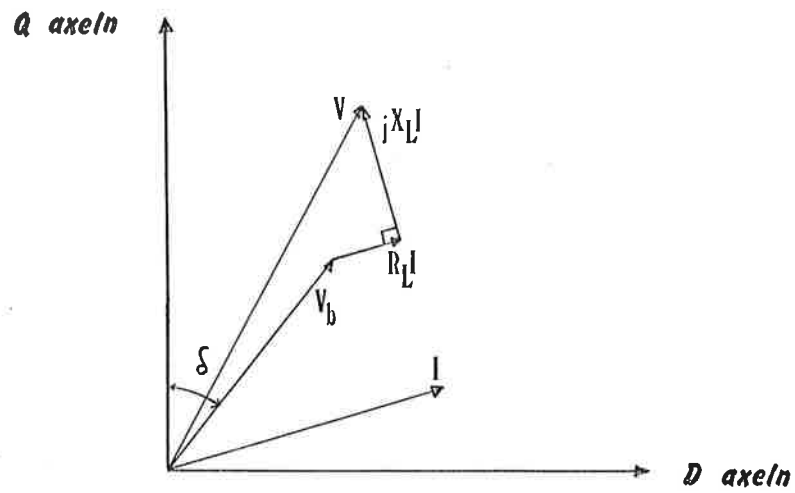


FIG. 2.7

### 2.7.2 NÄTMODELL 2

Nätmodellen kan göras mer noggrann genom att man även tar hänsyn till transienta förlopp och inte bara stationära förhållanden.

Ekvationerna (8) kompletteras då till:

$$\begin{aligned} v_d &= R_l i_d + L_l \frac{d}{dt} i_d - \omega_o L_l i_q + v_b \sin \delta \\ v_q &= R_l i_q + L_l \frac{d}{dt} i_q + \omega_o L_l i_d + v_b \cos \delta \end{aligned} \quad (8')$$



### 3. PARAMETERBESTÄMNING

I detta kapitel beskrives hur synkronmaskinens parametrar framtages med olika tester. Dessa parametrar kan användas till att jämföra prestanda för olika synkronmaskiner men de skiljer sig från den parameteruppsättning som vi använde i kapitel 2. Materialet har i huvudsak tagits från [1], [3], [5], [8] och [9].

#### 3.1 KORTSLUTNINGSPROV

I testet kortslutes faserna från generatorm genom lämpliga amperemätare, så att kortslutningsströmmen  $I_{sc}$  kan mätas. Fältlindningen matas med likström och fältströmmen  $I_f$  uppmätas. Uppkopplingen visas i fig 3.1.

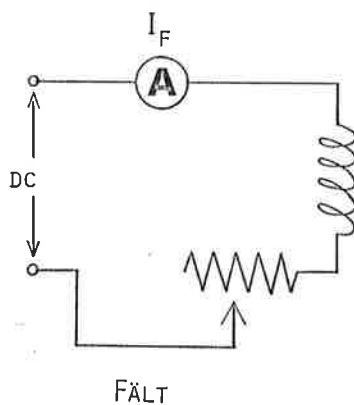


FIG. 3.1A

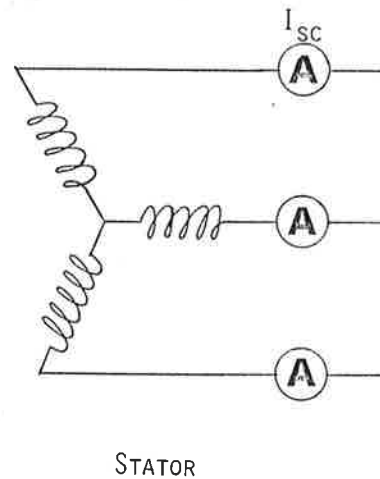


FIG. 3.1B

Sambandet mellan  $I_{sc}$  och  $I_f$  plottas in i ett diagram, det s.k. kortslutningskaraktistikan (se fig 3.2).

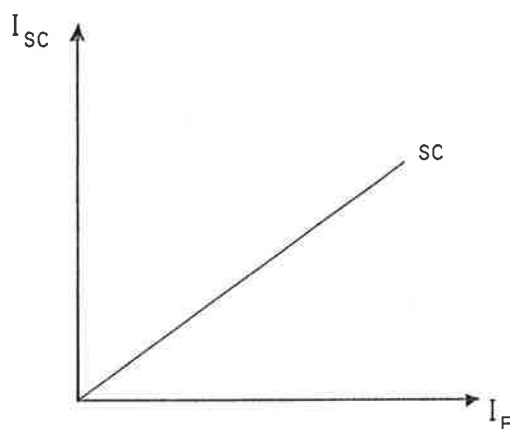


FIG. 3.2 KORTSLUTNINGSKARAKTERISTIKA

### 3.2 TOMGÅNGSPROV

Maskinen drives vid synkront varvtal utan någon belastning inkopplad (alltså i "tomgång"). Sambandet mellan tomgångsspänningen  $V_{oc}$  och fältströmmen  $I_f$  plottas in i ett diagram, det s.k. tomgångskaraktistikan (se fig 3.3).

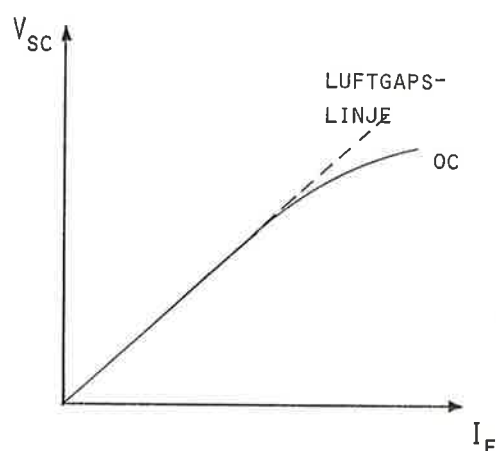


FIG. 3.3 TOMGÅNGSKARAKTERISTIKA

Kurvan ligger till en början på en rät linje, luftgapslinjen, men avviker sedan från denna p.g.a. magnetisk mättning.

Ur dessa båda tester kan nu den synkrona reaktansen i längsled  $X_d$  bestämmas.

### 3.3 BESTÄMMNING AV $X_d$

Kortslutnings- och tomgångskaraktistikan ritas in i samma diagram (se fig 3.4).

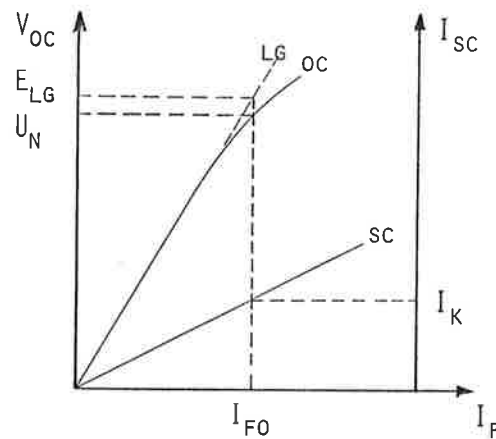


FIG. 3.4

Omättade synkrona reaktansen definieras:

$$X_{d,lg} = \frac{E_{lg}}{I_k}$$

Mättade synkrona reaktansen definieras:

$$X_{d,m} = \frac{U_n}{I_k}$$

Anm. Alla reaktanser kan erhållas i p.u.-enheter om de divideras med basimpedansen  $Z_{bas}$ .

Exempelvis:

$$x_{d,m} = \frac{X_{d,m}}{Z_{bas}}$$

$Z_{bas}$  fås ur sambandet:

$$Z_{bas} = \frac{U_n^2}{S_n}$$

$U_n$  = normalspänning  
 $S_n$  = normal VA

### 3.4 EFTERSLÄPNINGSPROV

Innebär att synkronmaskinen drives av en motor med ett varvtal nära det synkrona. Fältlindningen hålles öppen och ankarlindningarna matas med en påtryckt symmetrisk trefasspänning av märkfrekvens. Ankarspänningen  $U_a$ , ankarströmmen  $I_a$  samt spänningen över den öppna fältlindningen  $U_f$  uppmättes eller oscillograferas (se fig 3.5)

Eftersläpningsprovet har en del nackdelar, främst att rotorn har en tendens att synkroniseras med ankarfältet samt att ström kommer att flyta i kortslutna rotorkretsar.

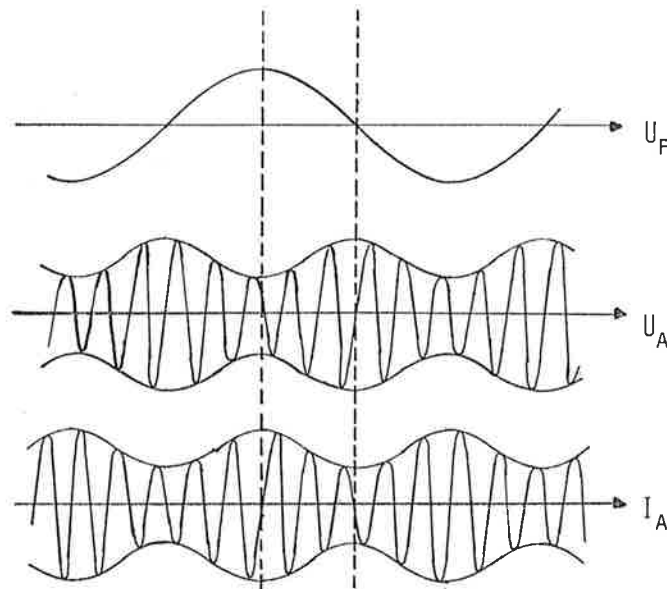


FIG. 3.5 EFTERSLÄPNINGSPROV

### 3.5 BESTÄMMNING AV $X_q$

$X_q$  kan bestämmas ur eftersläpningsprovet som:

$$X_q = \min \text{ av } \frac{U_a}{I_a}$$

Mer exakthet erhålles dock om man bestämmer förhållandet  $X_q / X_d$ .

$$\frac{X_q}{X_d} = \frac{\min \text{ av } U_a / I_a}{\max \text{ av } U_a / I_a}$$

$X_q$  kan nu bestämmas om  $X_d$  bestämts enligt tidigare.  
 $X_q$  kan även bestämmas på ett annat sätt där man slipper de nackdelar som eftersläpningsprovet har, nämligen genom:

### 3.5.1 Maximum-Lagging-Current-Test

Låt maskinen gå som tomgående motor. Minska magnetiseringen till noll och öka den långsamt negativt samtidigt som ankarströmmen  $I_a$  avläses.  $I_a$  ökar hela tiden till ett max.värde  $I_{a,max}$  där maskinen plötsligt tappar en poldelning d.v.s. maskinen faller ur fas men går snabbt in i synkronisering igen, efter att ha hoppat över en pol. Då är:

$$X_q = \frac{U_a}{I_{a,max}}$$

### 3.6 MÄTNINGAR AV REAKTANSER OCH TIDSKONSTANTER HÄNFÖRDA TRANSIENTA FÖRLOPP

Vid en plötslig kortslutning oscillograferas maskinens ankarström som en funktion av tiden. Mätströmmen tages från en induktansfri shunt. Magnetiseringsströmmens likkomponent hålles oförändrad under förloppet. Strömenveloppen ritas in i ett diagram (se fig 3.6).

På ett halvlogaritmiskt papper avsättes nu  $\Delta i''$ ,  $\Delta i'$  och  $\Delta i$  utefter den logaritmiska skalan. Tiden avsätts utefter den linjära skalan.

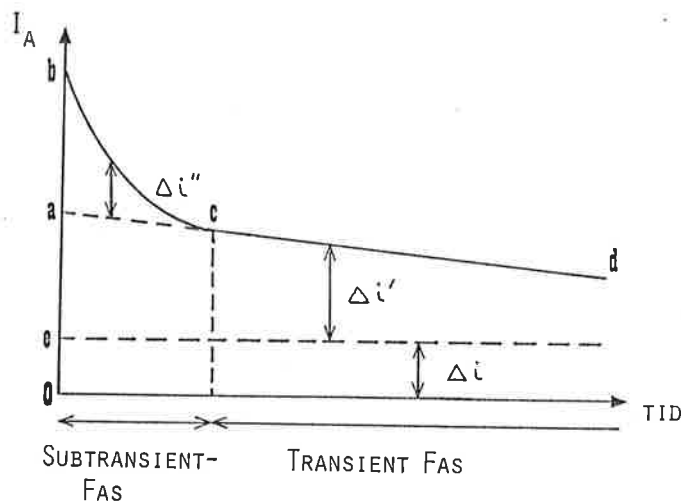


FIG. 3.6

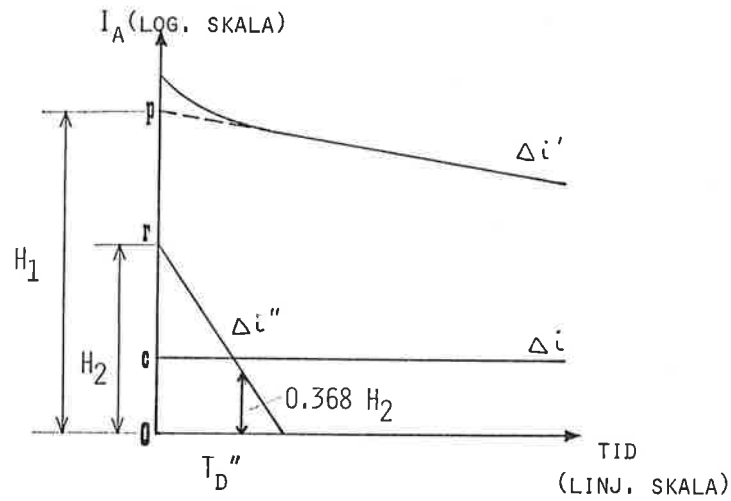


FIG. 3.7

### 3.6.1 Bestämning av $X_d'$ och $X_d''$

$$X_d' = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot (c+r)} \quad \text{Transient d-axel reaktans}$$

$$X_d'' = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot (c+r+p)} \quad \text{Subtransient -"- -"-}$$

Beteckningarna tagna ur fig 3.7 utom U som är den ursprungliga tomgångsspänningen (i RMS)

### 3.6.2 Bestämning av $T_d'$ och $T_d''$

$T_d''$  är den tid det tar för  $\Delta i''$  att reduceras till 0.368 (= 1/e) av ursprungsvärdet (se fig 3.7).

$T_d'$  är den tid det tar för  $\Delta i'$  att reduceras till 0.368 av ursprungsvärdet.

### 3.7 DIREKT BESTÄMNING AV $X''_d$ OCH $X''_q$

De subtransienta reaktanserna kan bestämmas genom ett prov med stillastående rotor och kortsluten fältlindning. Till två av maskinuttagen (faserna) ansluts en låg enfas växelspanning (se fig 3.8). Spänningen  $U$  samt aktiv effekt  $P$  uppmättes för några olika strömstyrkor, exempelvis:  $I = 0.5, 0.75, 1.0 I_n$ .

Reaktansen  $X$  kommer att variera med rotorläget.  $X$  beräknas ur:

$$X = \frac{\sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}{2 \cdot I^2}$$

Då strömmen genom den kortslutna magnetiseringskretsen är maximal får man:

$$X''_d = X_{I_f, \max}$$

Då  $I_f$  är minimal får man:

$$X''_q = X_{I_f, \min}$$

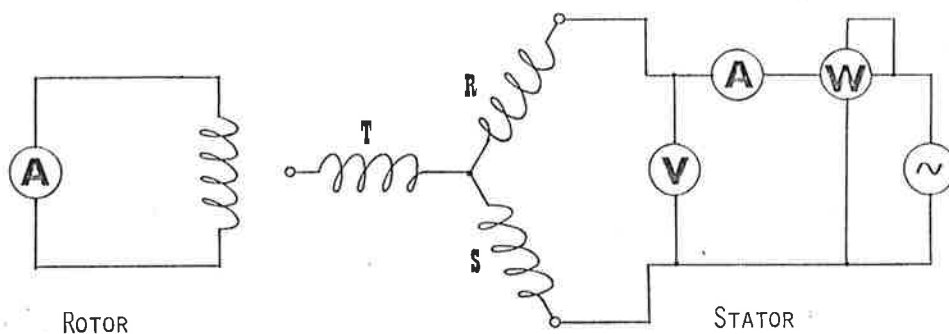


FIG. 3.8

Testproceduren är att låta maskinen gå på så sätt, att ingen aktiv effekt avges och genom att manuellt kontrollera magnetiseringsströmmen skapa under- eller överexciterade initialtillstånd. Maskinen kopplas från belastningen, som är rent reaktiv, och ändringar i utspänning och fältström observeras.

Med generatorm maskinen underexciterad kommer inga mättningsfenomen att vara närvarande, och testet kan användas till att bestämma de normala maskinparametrarna.

3.8.1 D-axel parametrar

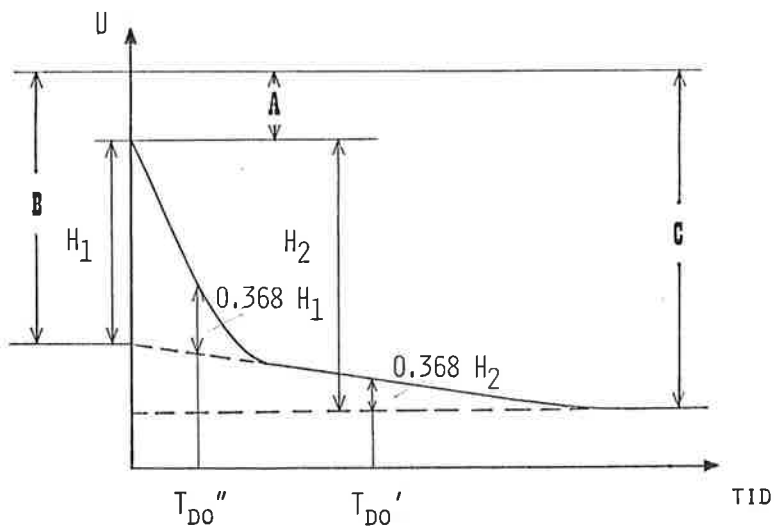


FIG. 3.9

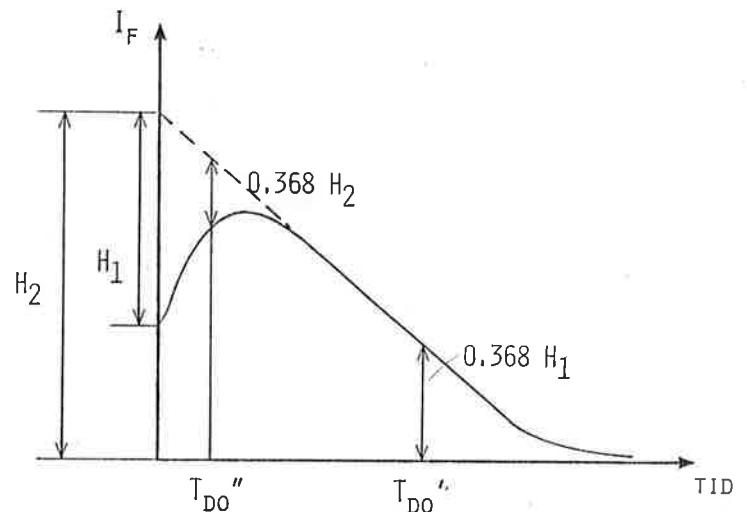


FIG. 3.10

I ovanstående figurer visas hur utspänning och fältström ändras vid urkoppling av en rent reaktiv belastning. Om strömstyrkan vid avbrottet var  $i_o$  kan d-axelparametrarna bestämmas som:

$$x_d = \frac{C}{i_o}$$

$$x_d' = \frac{B}{i_o}$$

$$x_d'' = \frac{A}{i_o}$$

$T_{do}'$  och  $T_{do}''$  fås direkt ur figurerna.



### 3.8.2 Q-axel parametrar

För att bestämma parametrarna för q-axeln är det önskvärt att ha en belastning på maskinen, så att statorströmmarna endast består av en q-axelkomponent. Detta uppnås enklast genom successiva försök, där man kopplar ifrån lasten och mäter den maximala fältströmsändringen  $\Delta I_{f,max}$ . Den last där  $\Delta I_{f,max} = 0$  är den sökta (se fig 3.11).

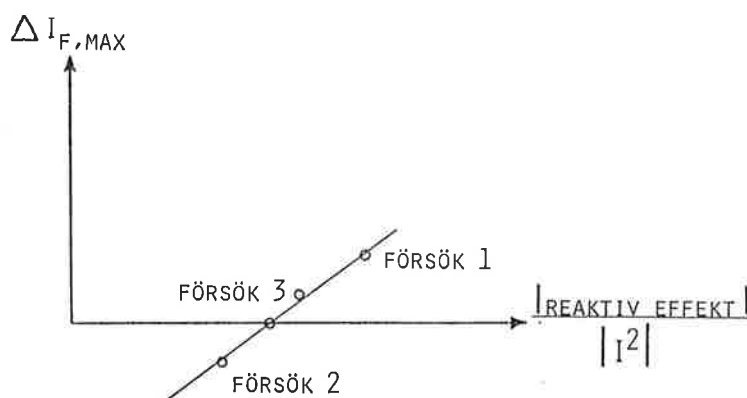


FIG. 3.11

Med denna speciella last utföres testet på samma sätt som tidigare, d.v.s. lasten kopplas ur och utspänningen observeras. I fig 3.12 visas hur utspänningen nu ser ut som en funktion av tiden. Q-axelparametrarna kan nu bestämmas enligt:

$$X_q'' = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{B^2 - C^2}}{i_0}$$

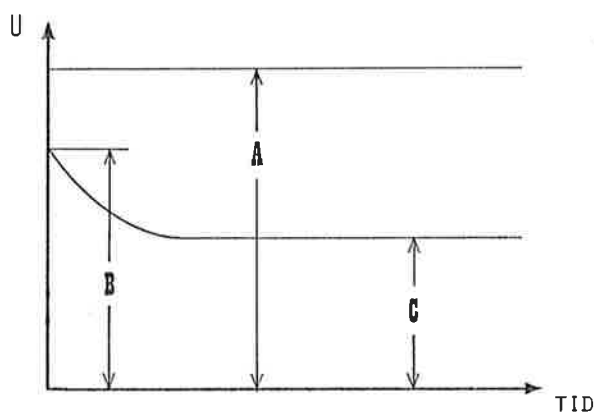


FIG. 3.12

## 4 PARAMETERKONVERTERING

Vi har i de tidigare kapitlen sett, att de parametrar man får ur maskintester ( $X_d$ ,  $X'_d$  etc.) skiljer sig från de man använder för att matematiskt beskriva maskinen ( $L_d$ ,  $L_{afm}$  etc.) I detta kapitel ska vi ta fram några konverteringsrutiner som omvandlar dessa uppmätbara parametrar till de mer användbara i kapitel 2. Referenser har i huvudsak varit [2] och [7].

### 4.1 FÖRUTSÄTTNINGAR

I den mest avancerade modellen i kapitel 2, modell 3, har vi 12 okända parametrar nämligen:  $R_f$ ,  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $L_{afm}$ ,  $L_{axm}$ ,  $L_{aym}$ ,  $L_{ff}$ ,  $L_{xx}$ ,  $L_{fx}$ ,  $L_{yy}$ .

Kända parametrar är:  $X_d$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $X_q$ ,  $X''_q$ ,  $T_{d0}$ ,  $T''_{d0}$ ,  $T_{q0}$  och  $R_a$  ( $R_a$  antages vara uppmätbar genom direkt resistansmätning på ankarlindningarna).

Vi har alltså fler obekanta parametrar än kända. För att få ekvationerna att gå ihop får vi anta att  $R_f$ ,  $R_x$  och  $R_y$  är uppmätbara eller går att uppskattas approximativt.

Vi antar dessutom att följande samband råder:

$$\frac{L_{axm} L_{fx}}{L_{xx} L_{afm}} = 1$$

Vilket i praktiken innebär att en transient ändring i statorströmmen omedelbart kommer att reflekteras i dämplindningarna och ej påverka magnetfältet. Detta är ofta ett välgrundat antagande (se sid 14 i [7]).

### 4.2 EKVATIONSUNDERLAG

Följande ekvationer bildar underlaget för de konverteringsrutiner som finns medtagna i appendix.

$$X_d = \omega_o \cdot L_d$$

$$X_d' = X_d - \omega_o \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{afm}^2}{L_{ff}}$$

$$X_d'' = X_d - \omega_o \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{axm}^2}{L_{xx}}$$

$$X_q = \omega_o \cdot L_q$$

$$X_q'' = X_q - \omega_o \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{aym}^2}{L_{yy}}$$

$$T_{do}' = \frac{L_{ff}}{R_f}$$

$$T_{do}'' = \frac{L_{xx}}{R_x}$$

$$T_{qo}'' = \frac{L_{yy}}{R_y}$$

$$L_{axm} \cdot L_{fx} = L_{afm} \cdot L_{xx}$$

Om man använder p.u. enheter är det lämpligt att sätta  $R_f$ ,  $R_x$  och  $R_y$  i storleksordningen 0.01 - 0.001 då dessa resistanser är tämligen små i jämförelse med maskinens basimpedans  $Z_{bas}$ .

I appendix bifogas även program som omvandlar parametrarna mellan p.u. och SI-enheter.

## 5 SIMULERINGSMODELLER

I detta kapitel har tre olika simuleringssmodeller av en synkrongenerator kopplat till ett starkt nät tagits fram. Modellerna är skrivna i simuleringsspråket SIMNON och programlistningarna återfinnes i Appendix.

Utgångspunkt till modellerna har varit ekv. (2)..(7) samt de båda nätmodellerna ekv. (8) och (8') från kapitel 2. Parametrarna är beräknade enligt konverteringsrutinerna i kapitel 4. De olika modellerna skiljer sig bl.a. i valet av nätmodell och tillståndsvariabler.

Nedanstående blockschema visar i grova drag hur simuleringssmodellerna är uppbyggda (fig visar Modell A).

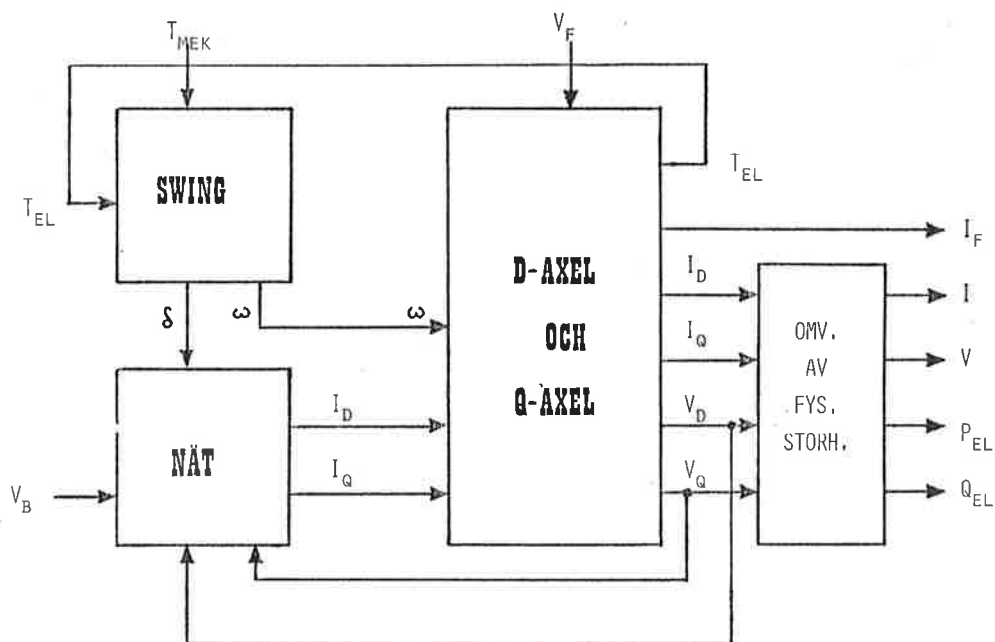


FIG. 5.1

### 5.1 MODELL A

I denna modell har ekv. (2) förenklats på så sätt att uttrycken för  $v_d$  och  $v_q$  blivit:

$$\begin{aligned} v_d &= -\omega \cdot \lambda_q \\ v_q &= \omega \cdot \lambda_d \end{aligned}$$

Termerna  $-R_a \cdot i_d$  och  $-R_a \cdot i_q$  har alltså försummats liksom tidsderivatorna  $\dot{\lambda}_d$  och  $\dot{\lambda}_q$ , då de i regel är jämförelsevis små.

Dessutom har alla nollsekvensstorheter satts lika med noll ( Detta gäller samtliga modeller ). Som nät har valts den enklare modellen som beskrivs av ekv. (8).

#### Data:

Insignaler :  $T_{mek}, v_f, v_b$

Utsignaler :  $P_{el}, Q_{el}, i_f, i, v, i_{amp}, v_{amp}$

Tillstånd :  $\lambda_f, \lambda_x, \lambda_y, \omega, \delta$

Blockschemat för simuleringen av D- och Q-axeln visas i fig. 5.2 resp. 5.3. Swingekvationens blockschema ses i fig. 5.4.

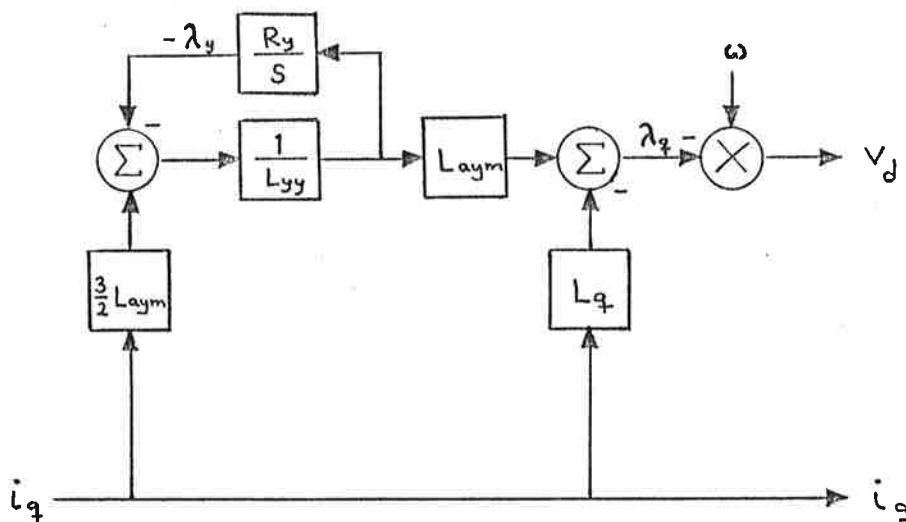


FIG. 5.3

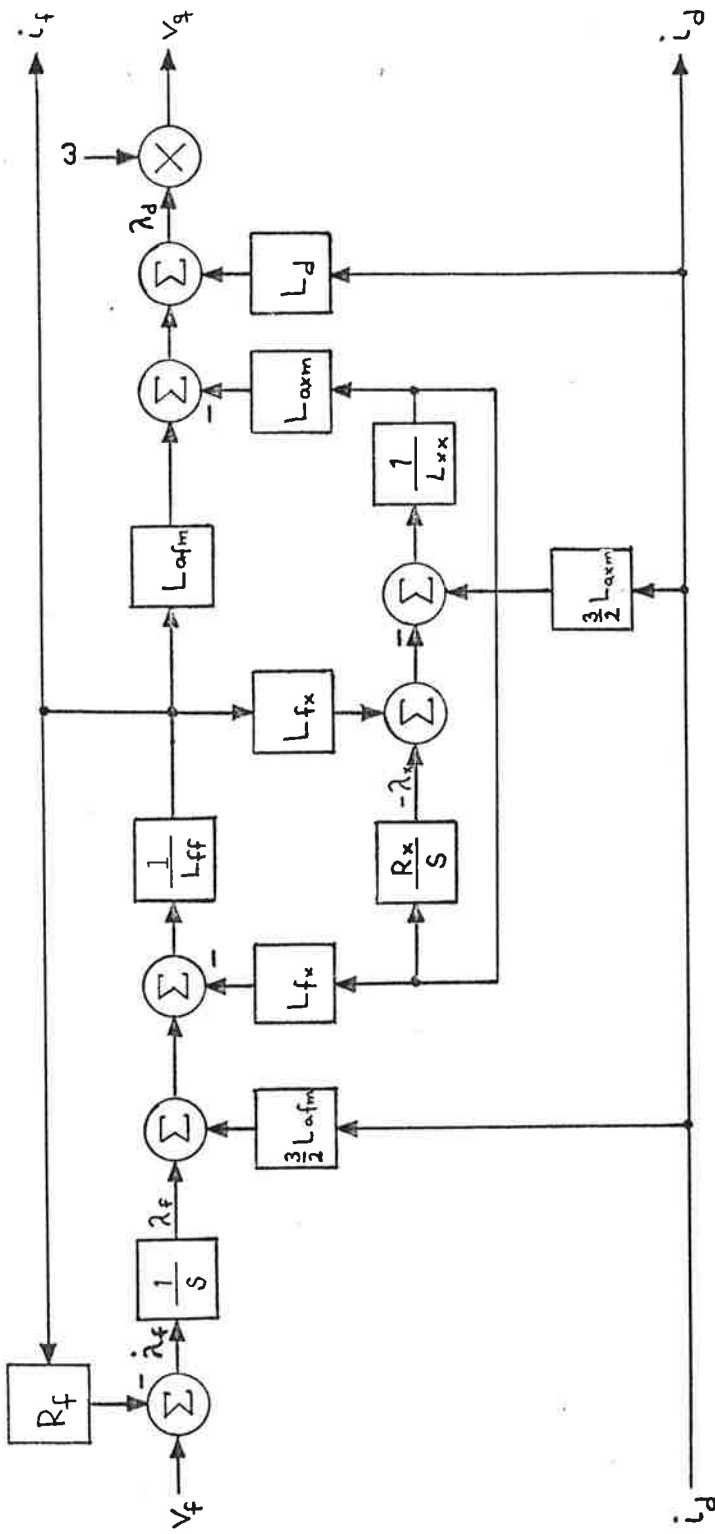


FIG. 5.2

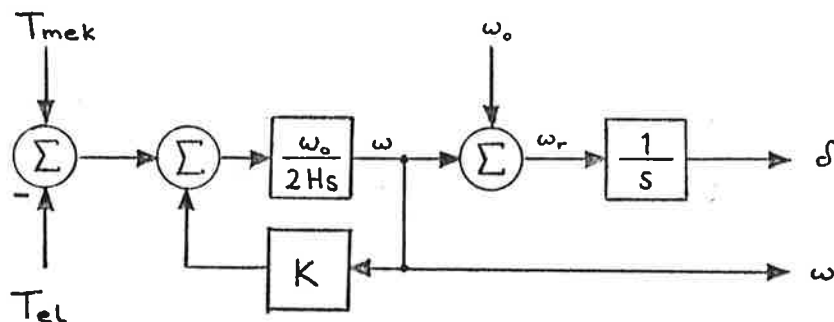


FIG. 5.4

Modell A kan (liksom Modell B och C) simuleras för 1, 2 eller 3 rotorlindningar genom lämpligt val av parametrar. För endast 2 rotorlindningar (f och x) sättes  $L_{aym}$  och  $R_y = 0$ . För endast en rotorlindning (f) sättes även  $R_x$  och  $L_{axm} = 0$ .

Kortslutnings- och tomgångsprov kan köras genom att sätta KORTSL resp. A = 1 normalt är dessa variabler = 0. Av dessa bägge faciliteter fungerar dock kortslutningsprovet ej tillfredsställande.

Ett antal simuleringar som har gjorts för denna modell finns också medtagna i Appendix. Dessa är:

- (1) Utspänning V och ström I vid normal körning.
- \* (2) Lastvinkeln vid stegökning och stegminskning av mek. inmoment  $T_{mek}$ .
- \* (3) Aktiv- och reaktiv effekt ( $P_{el}$  och  $Q_{el}$ ) vid stegökning av  $T_{mek}$ .
- \* (4)  $P_{el}$  och  $Q_{el}$  vid stegökning av magnetiserings-spänningen  $v_f$ .
- (5) Lastvinkeln vid ett plötsligt avbrott i  $v_f$ .  
 $v_f = 0$  mellan  $t = 20$  och  $23$

\* = Simulering har gjorts med 1, 2 och 3 rotorlindningar.

Observera att tidskalan ej är i sekunder, utan att 1 skaldel =  $1/100\pi$  sekunder.

## 5.2 MODELL B

Denna modell utgår från samma ekvationsunderlag som Modell A. Dock har man här istället den mer avancerade nätmodellen ekv. (8'). Blockschemat för denna nätmodell visas i fig. 5.5. Dessutom har man här infört två nya tillståndsvariabler  $i_d$  och  $i_q$ .

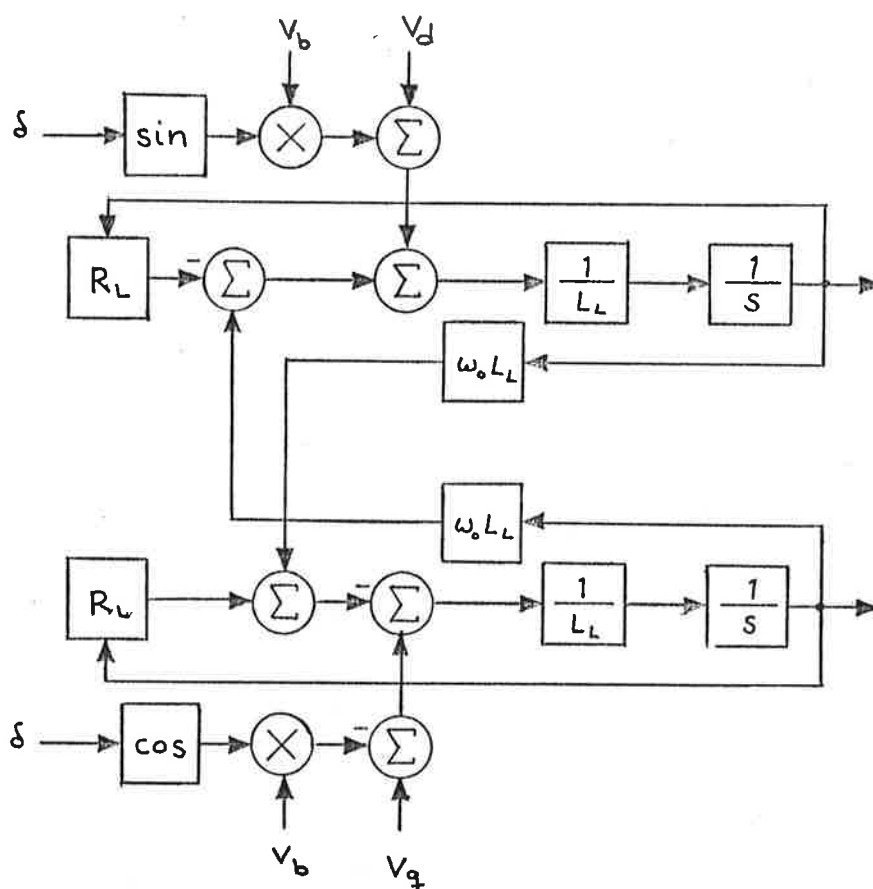


FIG. 5.5

Data:

Insignaler :  $T_{mek}, v_f, v_b$

Utsignaler :  $P_{el}, Q_{el}, i_f, i, v, i_{amp}, v_{amp}$

Tillstånd :  $i_d, i_q, \lambda_f, \lambda_x, \lambda_y, \omega, \delta$



I denna modell användes den enklare nätmodellen (dvs samma som i Modell A). Istället är själva generatormodellen mer komplett. Uttrycken för  $v_d$  och  $v_q$  i ekv. (2) sätts:

$$\begin{aligned} v_d &= \dot{\lambda}_d - \omega \cdot \lambda_q \\ v_q &= \dot{\lambda}_q + \omega \cdot \lambda_d \end{aligned}$$

Medtagandet av tidsderivatorna medför att  $\lambda_d$  och  $\lambda_q$  valts som tillståndsvariabler.

Data:

Insignaler :  $T_{mek}, v_f, v_b$

Utsignaler :  $P_{el}, Q_{el}, i_f, i, v, i_{amp}, v_{amp}$

Tillstånd :  $\lambda_d, \lambda_q, \lambda_f, \lambda_x, \lambda_y, \omega, \delta$

Blockschema för D- och Q-axeln visas i fig. 5.6 resp. 5.7.

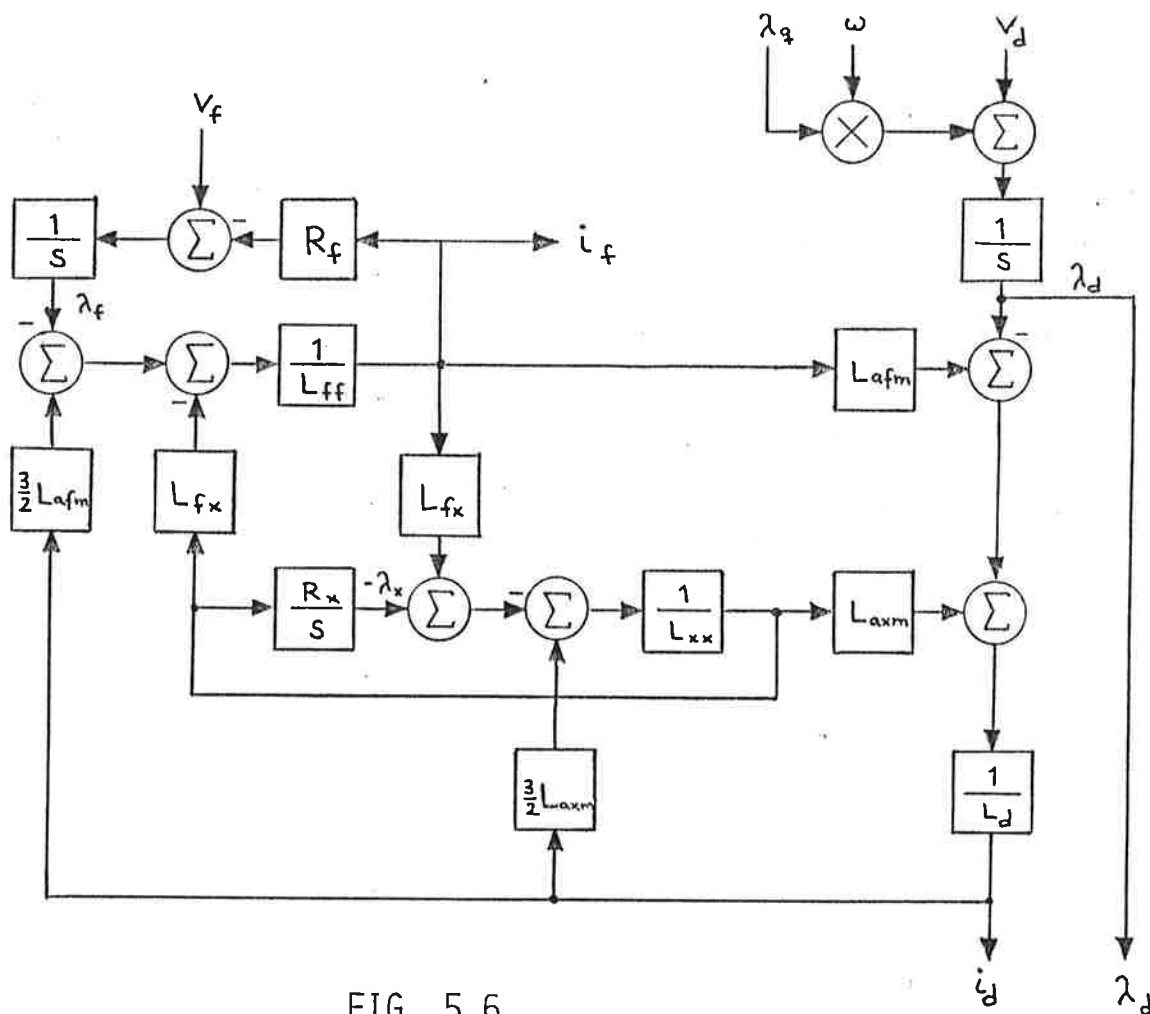


FIG. 5.6

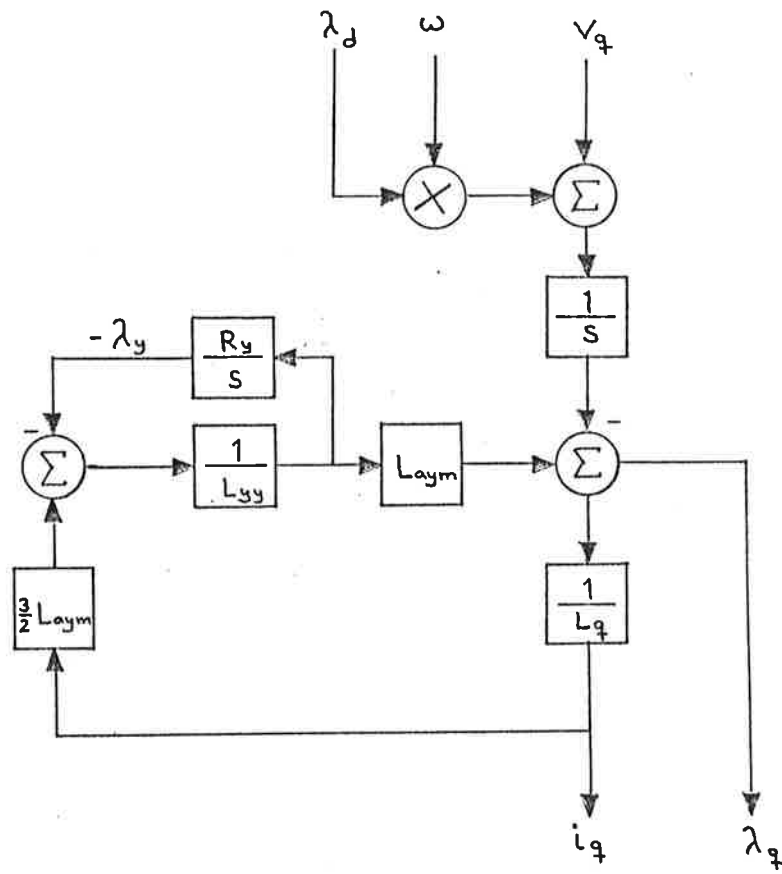


FIG. 5.7

GENFILE(1).SYNK1

```

1   CONTINUOUS SYSTEM SYNKA
2   "
3   "
4   "
5   " *****
6   " *
7   " *   A SIMPLE SYNCHRONOUS GENERATOR MODEL *
8   " *
9   " *****
10  "
11  "
12  OUTPUT PEL QEL IFF IA VA I V
13  TIME T
14  STATE FLF FLX FLY OMEGA DELTA
15  DER DFLF DFLX DFLY DOMEQ DDELTA
16  "
17  "
18  "-----"
19  "
20  INITIAL
21  "
22  TMEK: 1.0           " MEK. INMOMENT
23  VB: 1.0           " NAETSPAENNING
24  VF: 0.0050        " MAGN.SPAENNING
25  "
26  VINKEL: 0.0        "STARTVINKEL FOER KORTSL.PROV (RAD)
27  KORTSL: 0.0        "KORTSL=1 OM KORTSL.PROV
28  A: 0.0            "A=1 OM TOMGAANGSPROV
29  "
30  OMO: 1.0           "SYNKR.VINKELFREKVENSEN
31  H: 5.0            "ROTORNES TROEGHETSMOMENT
32  K: 2.0            "DAEMPKONSTANT
33  M: 4.0            "ANTAL POLER
34  "
35  RF: 0.0002         " RESISTANS F-LINDNING (P.U.)
36  RA: 0.001         " RESISTANS STATORLINDNING
37  RX: 0.0005        "   -ÉÉ-   X-   -ÉÉ-
38  RY: 0.0005        "   -ÉÉ-   Y-   -ÉÉ-
39  "
40  LD: 1.0           " INDUKTANS D-AXELN
41  LQ: 0.75          "   -ÉÉ-   Q-AXELN
42  LAFM: 5.066E-2    " OEMSESIDIGA INDUKTANSER
43  LAXM: 5.5857E-3  "   -ÉÉ-   -ÉÉ-
44  LAYM: 4.604E-3   "   -ÉÉ-   -ÉÉ-
45  LFF: 0.0055       "   -ÉÉ-   -ÉÉ-
46  LFX: 5.306E-4    "   -ÉÉ-   -ÉÉ-
47  LXX: 5.85E-4     "   -ÉÉ-   -ÉÉ-
48  LYY: 5.85E-4     "   -ÉÉ-   -ÉÉ-
49  "
50  XL: 0.13          " REAKTANS NAET
51  RL: 0.05          " RESISTANS NAET
52  "
53  DELTA0: 0.11      " LASTVINKEL (RAD)
54  OMEGA=OMO         " VINKELHASTIGHET
55  DELTA=DELTA0
56  IFO=VF/RF
57  F1=RL/(XL+OMO*LQ)
58  F2=F1*RL+XL+OMO*LD
59  F3=RL/(XL+OMO*LD)
60  F4=F3*RL+XL+OMO*LQ
61  F5=COS(DELTA0)
62  F6=SIN(DELTA0)
63  "

```

```

64     IDO=(OMO*LAFM*IFO-VB*(F5+F1*F6))/F2
65     IQO=(OMO*LAFM*F3*IFO-VB*(F3*F5-F6))/F4
66     "
67     FLF=-1.5*LAFM*IDO+LFF*IFO
68     FLX=-1.5*LAXM*IDO+LFX*IFO
69     FLY=-1.5*LAYM*IQO
70     "
71     "
72     D=LFF*LXX-LFX*LFX
73     K1=LAFM*LXX-LAXM*LFX
74     K2=LAXM*LFF-LAFM*LFX
75     K3=1.5*(LAFM*K1+LAXM*K2)-D*LD
76     K4=LAYM/LYY
77     K5=1.5*LAYM*LAYM/LYY-LQ
78     "
79     "
80     "
81     "-----"
82     "
83     OUTPUT
84     "
85     G1=OMEGA*K5/(D*RA)
86     G2=-OMEGA*K3/RA
87     G3=OMEGA*K5*G1+RA
88     G4=OMEGA*K5*G2-D*RA
89     "
90     "
91     C1=(OMEGA*K5-XL)/RL
92     C2=(OMEGA*K3-D*XL)/(D*RL)
93     C3=RL*(1+C1*C2)
94     C4=COS(DELTA)
95     C5=SIN(DELTA)
96     C6=-(OMEGA*(K1*C1*FLF/D+K2*C1*FLX/D+K4*FLY)+VB*(C5-C1*C4))/C3
97     C7=(OMEGA*(K1*FLF/D+K2*FLX/D-K4*C2*FLY)-VB*(C2*C5+C4))/C3
98     C8=-OMEGA*(K1*G1*FLF+K2*G1*FLX+K4*FLY)/G3
99     C9=-OMEGA*(K1*FLF+K2*FLX+K4*G2*FLY)/G4
100    "
101    KSI=OMEGA*T
102    "
103    B= IF KORTSL THEN (IF KSI<VINKEL THEN 0 ELSE 1) ELSE 0
104    "
105    ID= IF A THEN 0 ELSE (IF B THEN C8 ELSE C6)
106    IQ= IF A THEN 0 ELSE (IF B THEN C9 ELSE C7)
107    "
108    "
109    FLD=(K1*FLF+K2*FLX+K3*ID)/D           " MAGN. FLOEDE D-AXELN
110    FLQ=K4*FLY+K5*IQ                       "      -ÉÉ-      Q-AXELN
111    "
112    "
113    VD= IF B THEN 0 ELSE -OMEGA*FLQ        " SPAENNING D-AXELN
114    VQ= IF B THEN 0 ELSE OMEGA*FLD        "      -ÉÉ-      Q-AXELN
115    "
116    PEL=6.*(VD*ID+VQ*IQ)                   " AKTIV UTEFFEKT
117    QEL=6.*(VQ*ID-VD*IQ)                   " REAKTIV UTEFFEKT
118    "
119    IFF=(LXX*FLF-LFX*FLX+1.5*K1*ID)/D     " MAGN. STROEM
120    I=ID*COS(KSI)-IQ*SIN(KSI)              " KLAEMSTROEM
121    V=VD*COS(KSI)-VQ*SIN(KSI)              " KLAEMSPAENNING
122    "
123    IA=SQRT(ID*ID+IQ*IQ)                    " AMLPLITUD KLAEMSTROEM
124    VA=SQRT(VD*VD+VQ*VQ)                    "      -ÉÉ-      KLAEMSPAENNING
125    "
126    "-----"
127    "

```

```
128 DYNAMICS
129 "
130 K6=OM0/(2.0*H)
131 TEL=1.5*M*(FLD*IQ-FLQ*ID)
132 "
133 DOMEQ=K6*(TMEK-TEL-K*(OMEGA-OM0))
134 DDELTA=OMEGA-OM0
135 DFLF=VF-RF*IFF
136 DFLX=RX*(LFX*FLF-LFF*FLX-1.5*K2*ID)/D
137 DFLY=-RY*(FLY+1.5*LAYM*IQ)/LYY
138 "
139 "
140 END
```

GENFILE(1).SYNK2

```

1 CONTINUOUS SYSTEM SYNKB
2 "
3 "
4 "
5 " *****
6 " * *
7 " * A SIMPLE SYNCHRONOUS GENERATOR MODEL *
8 " * *
9 " *****
10 "
11 "
12 OUTPUT PEL QEL IFF IA VA I V
13 TIME T
14 STATE ID IQ FLF FLX FLY OMEGA DELTA
15 DER DID DIQ DFLF DFLX DFLY DOMEQ DDELT
16 "
17 "
18 "-----"
19 "
20 INITIAL
21 "
22 TMEK: 1.0 " MEK. INMOMENT
23 VB: 1.0 " NAETSPAENNING
24 VF: 0.005 " MAGN. SPAENNING
25 "
26 VINKEL: 0.0 " STARTVINKEL FOER KORTSL. PROV
27 KORTSL: 0.0 " KORTSL=1 OM KORTSL.PROV
28 A: 0.0 " A=1 OM TOMGAANGSPROV
29 "
30 OMO: 1.0 " SYNKR. VINKELFREKVENSEN
31 H: 5.0 " ROTORNSTROEGHETSMOMENT
32 K: 2.0 " DAEMPKONSTANT
33 M: 4.0 " ANTAL POLER
34 "
35 RA: 0.001 " RESISTANS STATORLINDNING
36 RF: 0.0002 " -"- F-LINDNING
37 RX: 0.0005 " -"- X- -"-
38 RY: 0.0005 " -"- Y- -"-
39 "
40 LD: 1.0 " INDUKTANS D-AXELN
41 LQ: 0.75 " -"- Q- -"-
42 "
43 LAFM: 5.066E-2 " OEMSESIDIGA INDUKTANSER
44 LAXM: 5.5857E-3 " -"- -"-
45 LAYM: 4.604E-3 " -"- -"-
46 LFF: 0.0055 " -"- -"-
47 LFX: 5.442E-4 " -"- -"-
48 LXX: 5.85E-4 " -"- -"-
49 LYY: 5.85E-4 " -"- -"-
50 "
51 LL: 0.13 " INDUKTANS NAET
52 RL: 0.05 " RESISTANS NAET
53 "
54 DELTAC: 0.11 " LASTVINKEL (INITIALVAERDE)
55 DELTA= IF A THEN 0 ELSE DELTAC
56 OMEGA=OMO
57 IFFC=VF/RF " FAELTSTROEM (INITIALVAERDE)
58 "
59 F1=(RL+RA)/(OMO*LL-OMO*LQ)
60 F2=F1*(RL+RA)+OMO*(LL+LD)
61 F3=(RL+RA)/(OMO*LL+OMO*LD)
62 F4=F3*(RL+RA)+OMO*(LL+LQ)
63 F5=SIN(DELTAC)

```

```

64 F6=COS(DELTA C)
65 "
66 ID0=(OM0*LAFM*IFF0-VB*(F1*F5+F6))/F2
67 IQ0=(OM0*LAFM*F3*IFF0+VB*(F5-F3*F6))/F4
68 "
69 ID= IF A THEN 0 ELSE ID0
70 IQ= IF A THEN 0 ELSE IQ0
71 "
72 FLF=-1.5*LAFM*ID+LFF*IFF0
73 FLX=-1.5*LAXM*ID+LFX*IFF0
74 FLY=-1.5*LAYM*IQ
75 "
76 D=LFF*LXX-LFX*LFX
77 K1=LAFM*LXX-LAXM*LFX
78 K2=LAXM*LFF-LAFM*LFX
79 K3=1.5*(LAFM*K1+LAXM*K2)-D*LD
80 K4=LAYM/LYY
81 K5=1.5*LAYM*LAYM/LYY-LQ
82 "
83 "
84 "-----"
85 "
86 OUTPUT
87 "
88 IFF=(LXX*FLF-LFX*FLX+1.5*K1*ID)/D
89 IX=(LFF*FLX-LFX*FLF+1.5*K2*ID)/D
90 IY=FLY/LYY+1.5*LAYM*IQ/LYY
91 "
92 KSI=OMEGA*T
93 "
94 B= IF KORTSL THEN (IF KSI<VINKEL THEN 0 ELSE 1) ELSE 0
95 "
96 FLD=(K1*FLF+K2*FLX+K3*ID)/D
97 FLQ=K4*FLY+K5*IQ
98 "
99 C1=-RA*ID-OMEGA*FLQ
100 C2=-RA*IQ+OMEGA*FLD
101 "
102 VD= IF B THEN 0 ELSE C1
103 VQ= IF B THEN 0 ELSE C2
104 "
105 PEL=6.0*(VD*ID+VQ*IQ)
106 QEL=6.0*(VQ*ID-VD*IQ)
107 "
108 I=ID*COS(KSI)-IQ*SIN(KSI)
109 V=VD*COS(KSI)-VQ*SIN(KSI)
110 "
111 IA=SQRT(ID*ID+IQ*IQ)
112 VA=SQRT(VD*VD+VQ*VQ)
113 "
114 "
115 "-----"
116 "
117 DYNAMICS
118 "
119 TEL=1.5*M*(FLD*IQ-FLQ*ID)
120 C3=(VD-RL*ID+OM0*LL*IQ-VB*SIN(DELTA))/LL
121 C4=(VQ-RL*IQ-OM0*LL*ID-VB*COS(DELTA))/LL
122 "
123 DID= IF A THEN 0 ELSE C3
124 DIQ= IF A THEN 0 ELSE C4
125 DFLF=VF-RF*IFF
126 DFLX=-RX*IX
127 DFLY=-RY*IY

```

```
128 DDELTA=OMEGA-OM0
129 D OMEG=OM0*(TMEK-TEL-K*(OMEGA-OM0))/(2.0*H)
130 END
```



```
GENFILE(1).SYNK3
```

```

1 CONTINUOUS SYSTEM SYNKC
2 "
3 "
4 "
5 " *****
6 " * *
7 " * A SIMPLE SYNCHRONOUS GENERATOR MODEL *
8 " * *
9 " *****
10 "
11 "
12 OUTPUT PEL QEL IFF IA VA I V
13 TIME T
14 STATE FLD FLQ FLF FLX FLY OMEGA DELTA
15 DER DFLD DFLQ DFLF DFLX DFLY DOMEQ DDELT
16 "
17 "
18 "
19 "-----"
20 INITIAL
21 "
22 TMEK: 1.0 " MEK. INMOMENT
23 VØ: 1.0 " NAETSPAENNING
24 VF: 0.005 " MAGN. SPAENNING
25 "
26 VINKEL: 0.0 " STARTVINKEL FOER KORTSL. PROV
27 KORTSL: 0.0 " KORTSL=1 OM KORTSL. PROV
28 A: 0.0 " A=1 OM TOMGAANGSPROV
29 "
30 OMO: 1.0 " SYNKRONA VINKELFREKVENSEN
31 H: 5.0 " ROTORNS TROEGHETSMOMENT
32 K: 2.0 " DAEMPKONSTANT
33 M: 4.0 " ANTAL POLER
34 "
35 RA: 0.001 " RESISTANS STATORLINDNING
36 RF: 0.0002 " -"- F-LINDNING
37 RX: 0.0005 " -"- X- -"-
38 RY: 0.0005 " -"- Y- -"-
39 "
40 LD: 1.0 " INDUKTANS D-AXELN
41 LQ: 0.75 " -"- Q-AXELN
42 LAFM: 5.066E-2 " OEMSESIDIGA INDUKTANSER
43 LAXM: 5.5857E-3 " -"- -"-
44 LAYM: 4.604E-3 " -"- -"-
45 LFF: 0.0055 " -"- -"-
46 LFX: 5.442E-4 " -"- -"-
47 LXX: 5.85E-4 " -"- -"-
48 LYY: 5.85E-4 " -"- -"-
49 "
50 LL: 0.13 " INDUKTANS NAET
51 RL: 0.05 " RESISTANS NAET
52 "
53 DELTAA: 0.11 " LASTVINKEL (INITIALVAERDE)
54 DELTA= IF A THEN 0 ELSE DELTAA
55 OMEGA=OMO
56 IFFQ=VF/RF
57 "
58 F1=(RL+RA)/(OMO*LL-OMO*LQ)
59 F2=F1*(RL+RA)+OMO*(LL+LD)
60 F3=(RL+RA)/(OMO*LL+OMO*LD)
61 F4=F3*(RL+RA)+OMO*(LL+LQ)
62 F5=SIN(DELTAA)
63 F6=COS(DELTAA)

```

```

64      "
65      ID0=(OMO*LAFM*IFF0-VB*(F1*F5+F6))/F2
66      IQ0=(OMO*F3*LAFM*IFF0+VB*(F5-F3*F6))/F4
67      "
68      FLD=-LD*ID0+LAFM*IFF0
69      FLQ=-LQ*IQC
70      FLF=-1.5*LAFM*ID0+LFF*IFF0
71      FLX=-1.5*LAXM*ID0+LFX*IFF0
72      FLY=-1.5*LAYM*IQC
73      "
74      D=LFF*LXX-LFX*LFX
75      K1=LAFM*LXX-LAXM*LFX
76      K2=LAXM*LFF-LAFM*LFX
77      K3=1.5*(LAFM*K1+LAXM*K2)-D*LD
78      K4=LAYM/LYY
79      K5=1.5*LAYM*LAYM/LYY-LQ
80      "
81      "
82      "-----"
83      "
84      OUTPUT
85      "
86      C1=(D*FLD-K1*FLF-K2*FLX)/K3
87      C2=(FLQ-K4*FLY)/K5
88      "
89      ID= IF A THEN 0 ELSE C1
90      IQ= IF A THEN 0 ELSE C2
91      "
92      IFF=(LXX*FLF-LFX*FLX+1.5*K1*ID)/D
93      IX=(LFF*FLX-LFX*FLF+1.5*K2*ID)/D
94      IY=(FLY+1.5*LAYM*IQ)/LYY
95      "
96      C3=RL*ID-OMO*LL*IQ+VB*SIN(DELTA)
97      C4=RL*IQ+OMO*LL*ID+VB*COS(DELTA)
98      "
99      KSI=OMEGA*T
100     "
101     B= IF KORTSL THEN (IF KSI<VINKEL THEN 0 ELSE 1) ELSE 0
102     "
103     VD= IF B THEN 0 ELSE (IF A THEN 0 ELSE C3)
104     VQ= IF B THEN 0 ELSE (IF A THEN OMEGA*LAFM*IFF ELSE C4)
105     "
106     PEL=6*(VD*ID+VQ*IQ)
107     QEL=6*(VQ*ID-VD*IQ)
108     "
109     I=ID*COS(KSI)-IQ*SIN(KSI)
110     V=VD*COS(KSI)-VQ*SIN(KSI)
111     "
112     IA=SQRT(ID*ID+IQ*IQ)
113     VA=SQRT(VD*VD+VQ*VQ)
114     "
115     "
116     "-----"
117     "
118     DYNAMICS
119     "
120     TEL=1.5*M*(FLD*IQ-FLQ*ID)
121     "
122     DFLD=VD+RA*ID+OMEGA*FLQ
123     DFLQ=VQ+RA*IQ-OMEGA*FLD
124     DFLF=VF-RF*IFF
125     DFLX=-RX*IX
126     DFLY=-RY*IY
127     DDELTA=OMEGA-OMO
128     DOMEQ=OMO*(TMEK-TEL-K*(OMEGA-OMO))/(2.0*H)
129     END

```

## GENFILE(1).KONV1

```

1      C      KONVERTERINGSRUTIN FOER GEN.MODELL 1
2      C
3      REAL LD,LQ,LAFM,LFF
4      READ(NR,10) OMO,RF,XD,XDP,XQ,TDOP
5      C
6      C      NR SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
7      C
8      LD=XD/OMO
9      LFF=TDOP*RF
10     LAFM=SQRT((XD-XDP)*2.0*LFF/(3.0*OMO))
11     LQ=XQ/OMO
12     WRITE(NW,20) LD,LQ,LAFM,LFF
13     C
14     C      NW SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
15     C
16     10     FORMAT(6F6.3)
17     20     FORMAT(5X,'LD=',E9.4,'LQ=',E9.4,'LAFM=',E9.4,'LFF=',E9.4)
18     STOP
19     END

```

## GENFILE(1).KONV2

```

1      C      KONVERTERINGSRUTIN FOER GEN.MODELL 2
2      C
3      REAL LD,LQ,LAFM,LAYM,LFF,LYY
4      READ(NR,10) OMO,RF,RY,XD,XDP,XQ,XQPP,TDOP,TQOPP
5      C
6      C      NR SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
7      C
8      SLASK=3.0*OMO/2.0
9      LD=XD/OMO
10     LFF=TDOP*RF
11     LAFM=SQRT((XD-XDP)*LFF/SLASK)
12     LQ=XQ/OMO
13     LYY=TQOPP/RY
14     LAYM=SQRT((XQ-XQPP)*LYY/SLASK)
15     WRITE(NW,20) LD,LQ,LAFM,LAYM,LFF,LYY
16     C
17     C      NW SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
18     C
19     10     FORMAT (9E9.4)
20     20     FORMAT (5X,'LD=',E9.4,'LQ=',E9.4,'LAFM=',E9.4, /
21     *'LAYM=',E9.4,'LFF=',E9.4,'LYY=',E9.4)
22     STOP
23     END

```

GENFILE(1).KONV3

```

1      C      KONVERTERINGSRUTIN FOER GEN.MODELL 3
2      C
3      REAL LD,LQ,LAFM,LAXM,LAYM,LFF,LXX,LFX,LYY
4      READ(NR,10) OMO,RF,RX,RY,XD,XDP,XDPP,XQ,XQPP,TDOP,TDOPP,TQOPP
5      C
6      C      NR SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
7      C
8      SLASK=3.0*OMO/2.0
9      LD=XD/OMO
10     LFF=TDOP/RF
11     LAFM=SQRT((XD-XDP)*LFF/SLASK)
12     LXX=TDOPP*RX
13     LAXM=SQRT((XD-XDPP)*LXX/SLASK)
14     LFX=LXX*LAFM/LAXM
15     LQ=XQ/OMO
16     LYY=TQOPP*RY
17     LAYM=SQRT((XQ-XQPP)*LYY/SLASK)
18     WRITE(NW,20) LD,LQ,LAFM,LAXM,LAYM,LFF,LXX,LFX,LYY
19     C
20     C      NW SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
21     C
22     10  FORMAT (12E9.4)
23     20  FORMAT (5X,'LD=',E9.4,'LQ=',E9.4,'LAFM=',E9.4,'LAXM=',E9.4, /
24     *'LAYM=',E9.4,'LFF=',E9.4,'LXX=',E9.4,'LFX=',E9.4,'LYY=',E9.4)
25     STOP
26     END

```

GENFILE(1).PUSI

```

1      C      KONVERTERINGSRUTIN PU TILL SI-ENHETER
2      C
3      REAL LD,LQ,LAFM,LAXM,LAYM,LFF,LXX,LFY,LYY
4      READ(NR,10) OMO,OMPROP,PNOM,ZNOM,VNOM,TMEK,VB,VF,VINKEL,
5      *RA,RF,RX,RY,LD,LQ,LAFM,LAXM,LAYM,LFF,LXX,LFY,LYY,XL,RL
6      C
7      C      NR SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
8      C
9      TNOM=PNOM/OMPROP
10     TMEK1=TMEK*TNOM
11     VB1=VB*VNOM
12     VF1=VF*VNOM
13     VINK1=VINKEL/OMO
14     RA1=RA*ZNOM
15     RF1=RF*ZNOM
16     RX1=RX*ZNOM
17     RY1=RY*ZNOM
18     LD1=LD*ZNOM
19     LQ1=LQ*ZNOM
20     LAFM1=LAFM*ZNOM
21     LAXM1=LAXM*ZNOM
22     LAYM1=LAYM*ZNOM
23     LFF1=LFF*ZNOM
24     LXX1=LXX*ZNOM
25     LFX1=LFY*ZNOM
26     LYY1=LYY*ZNOM
27     XL1=XL*ZNOM
28     RL=RL*ZNOM
29     C
30     WRITE(NW,20) TMEK,VB1,VF1,VINK1,RA1,RF1,RX1,RY1,LD1,LQ1,
31     *LAFM1,LAXM1,LAYM1,LFF1,LXX1,LXX
32     *LAFM1,LAXM1,LAYM1,LFF1,LXX1,LYY1,XL1,RL1
33     C
34     C      NW SAETTES TILL LAEMPLIG SIFFRA
35     C
36     10  FORMAT (24E9.4)
37     20  FORMAT (5X,'TMEK=',E9.4,'VB=',E9.4,'VF=',E9.4,'VINKEL=',E9.4/
38     *'RA=',E9.4,'RF=',E9.4,'RX=',E9.4,'RY=',E9.4,'LD=',E9.4,/
39     *'LQ=',E9.4,'LAFM=',E9.4,'LAXM=',E9.4,'LAYM=',E9.4,'LFF=',E9.4/
40     *'LXX=',E9.4,'LYY=',E9.4,'XL=',E9.4,'RL=',E9.4)
41     STOP
42     END

```

APPENDIX III

Följande 7 sidor innehåller simuleringar av modell A. En del simuleringar har körts med olika antal rotorlindningar. Tyvärr syns i dessa simuleringar ingen större skillnad i dynamiken. Nedan följer några kommentarer om de simuleringar som gjorts.

sid 42: Utspänning  $V$  och ström  $I$  vid normal körning, dvs  $T_{mek} = 1.0$  och  $v_f = 0.0045$ . Man ser att  $V$  ligger före  $I$  i fas.

sid 43: Lastvinkeln vid först en stegökning av inmomentet  $T_{mek}$  och sedan en stegminskning tillbaka. Man ser att insvängningsförloppet är tämligen lika i båda fallen. Jämviktsläget uppnås efter ca 0.1 sek.

sid 44: Samma som den föregående, men denna gång med endast en rotorlindning.

sid 45: Aktiv- och reaktiv effekt  $P_{el}$  och  $Q_{el}$  vid stegökning av inmomentet  $T_{mek}$  från 1.0 till 1.2. Som synes ökar även  $P_{el}$  från 1.0 till 1.2, vilket stämmer då  $P_{el} = \omega \cdot T_{mek}$ . Däremot märks ingen större ändring i  $Q_{el}$  efter insvängningsförloppet.

sid 46: Samma som föregående, men med endast två rotorlindningar.

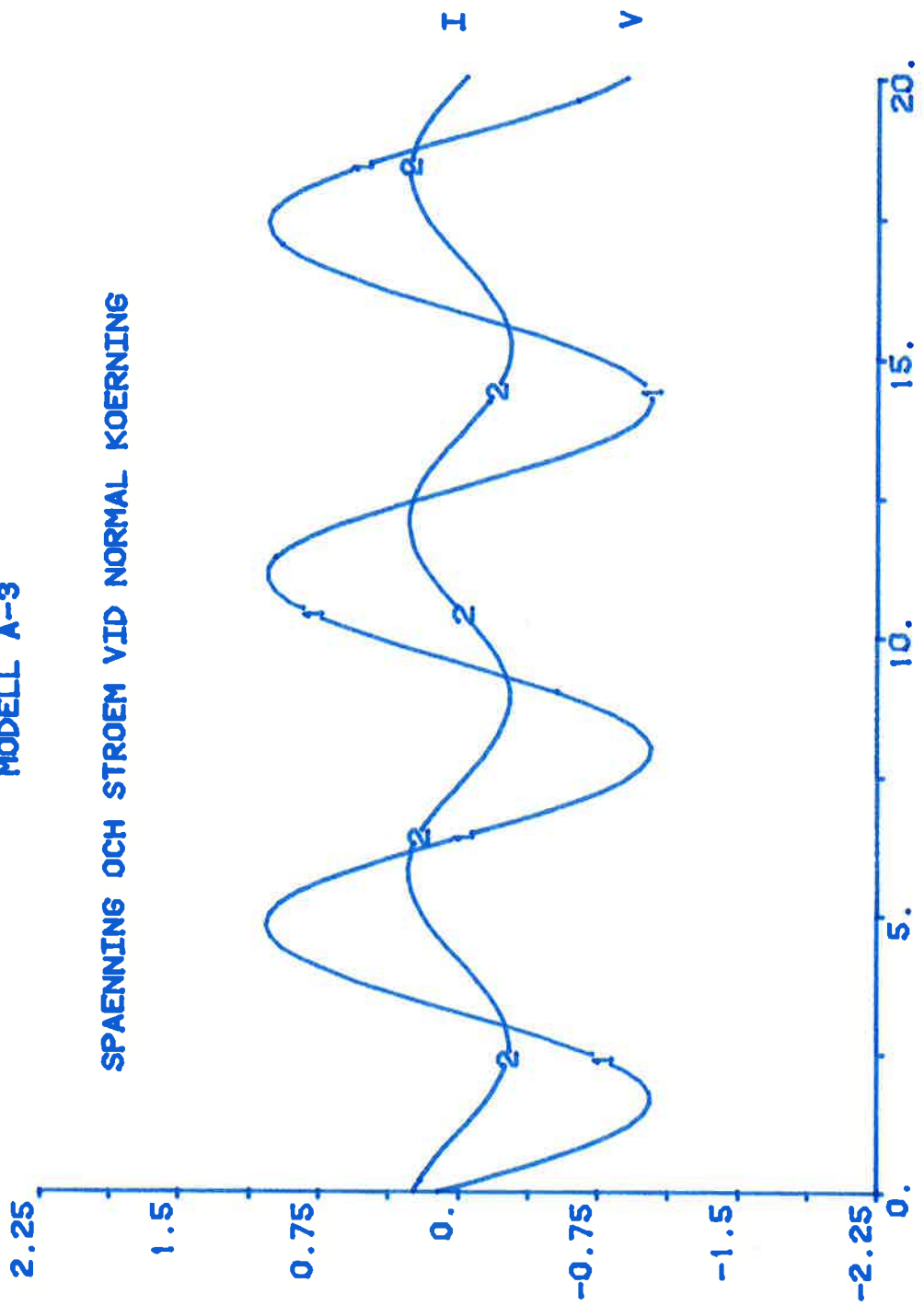
sid 47: Aktiv- och reaktiv effekt vid stegökning av magnetiserings-spänningen  $v_f$ . Man ser att  $Q_{el}$  är kraftigt beroende av  $v_f$  medan  $P_{el}$  knappt påverkas alls.

sid 48: Lastvinkeln  $\delta$  vid ett plötsligt avbrott i  $v_f$ . Avbrottet varar i ca 10 ms. Man ser att  $\delta$  hinner öka kraftigt under denna tid. Om avbrottet hade varit något längre skulle  $\delta$  vuxit till över  $\pi/2$ , vilket innebär att maskinen fasar ur.

1980-03-20 13:40:10 NR 1  
HCOFY

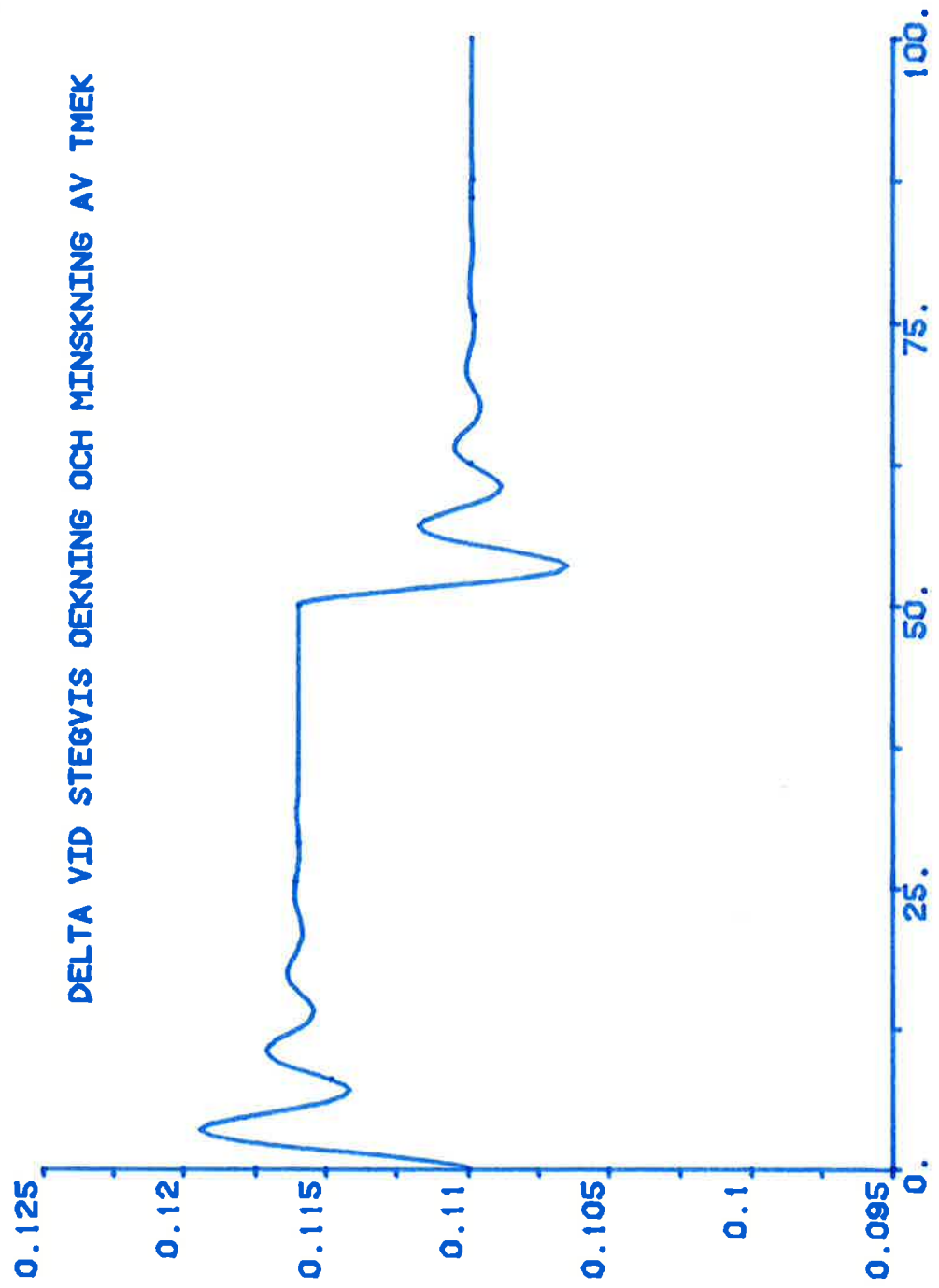
MODELL A-3

SPAENNING OCH STROEM VID NORMAL KOERNING



1980-03-20 13:48:04 NR 2  
HCOPY

MODELL A-3

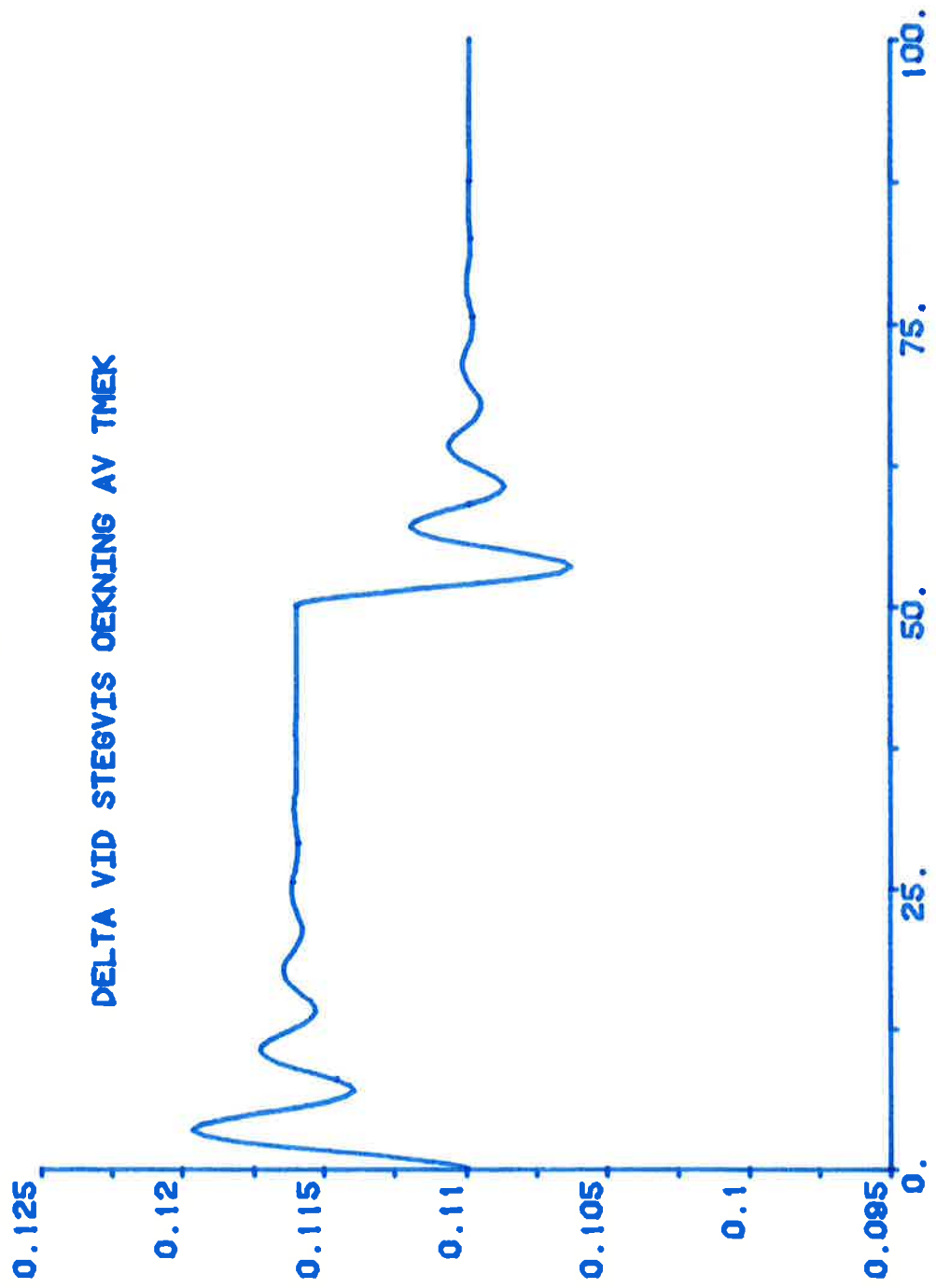




1980-03-20 14:55:03 NR 7  
HCOPY

MODELL A-1

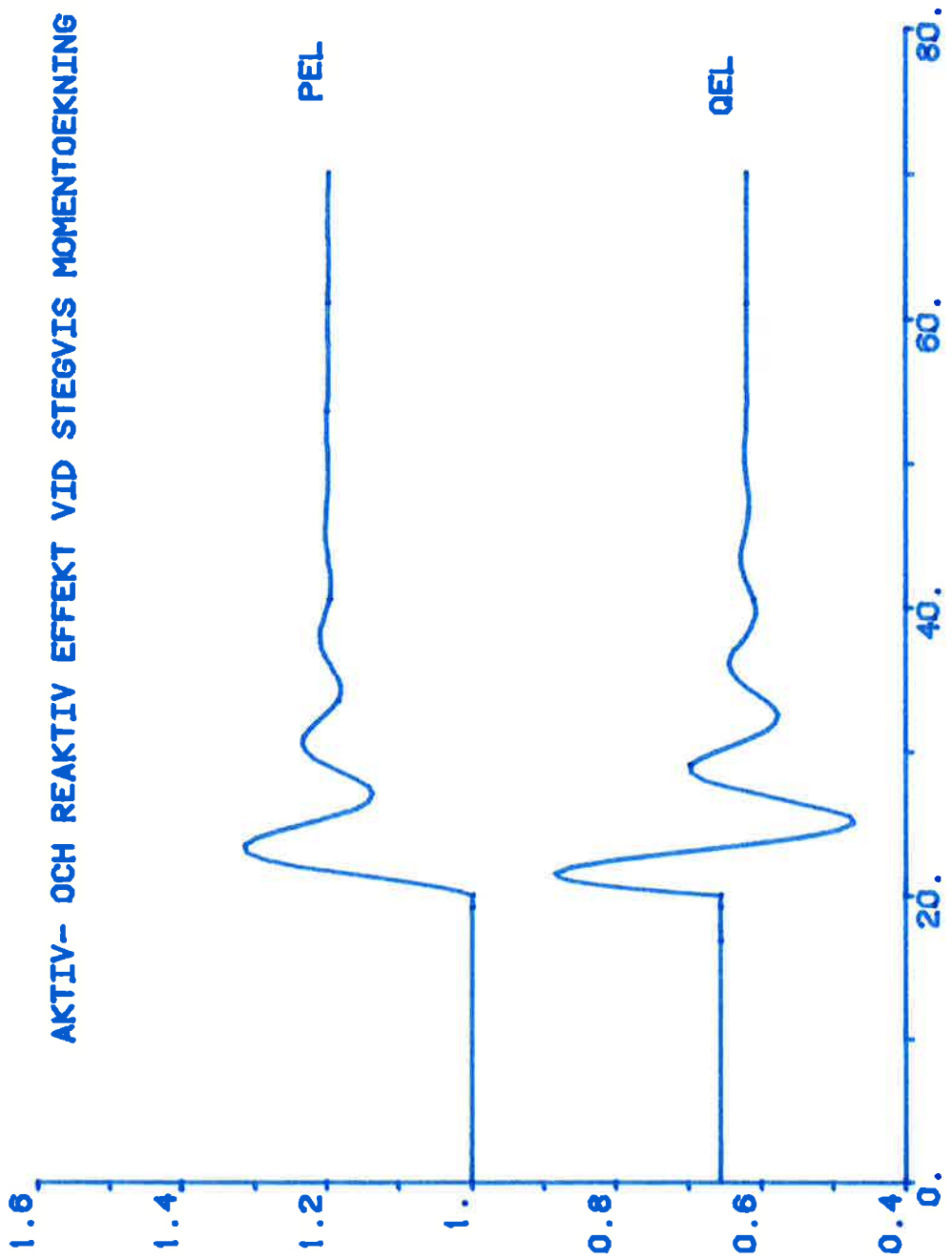
DELTA VID STEGVIS OEKNING AV TMEK



1980-03-20 13:54:25 NR 3  
HCOPY

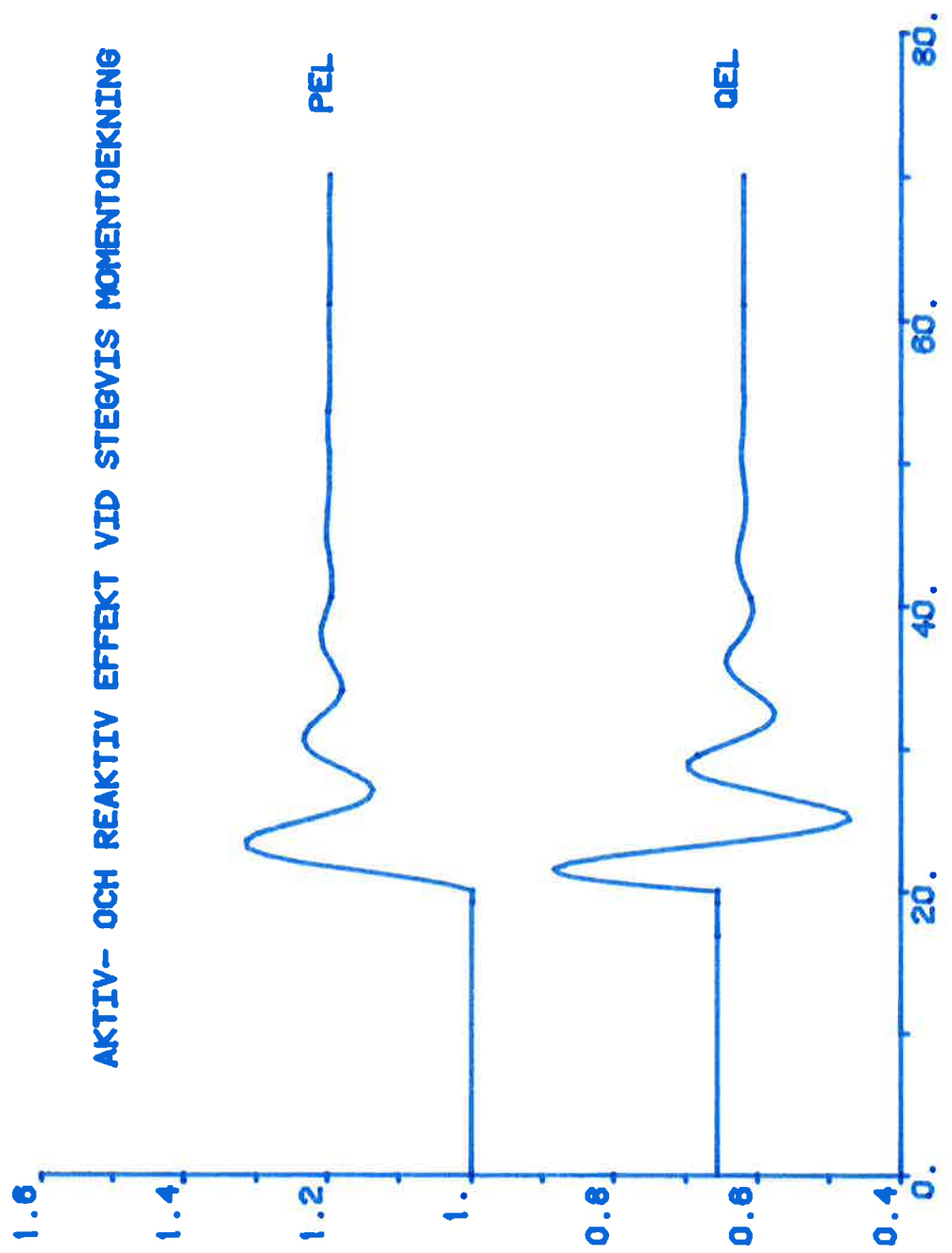
MODELL A-3

AKTIV- OCH REAKTIV EFFEKT VID STEGVIS MOMENTOEKNING



1980-03-20 14:40:36 NR 4  
HCOPY

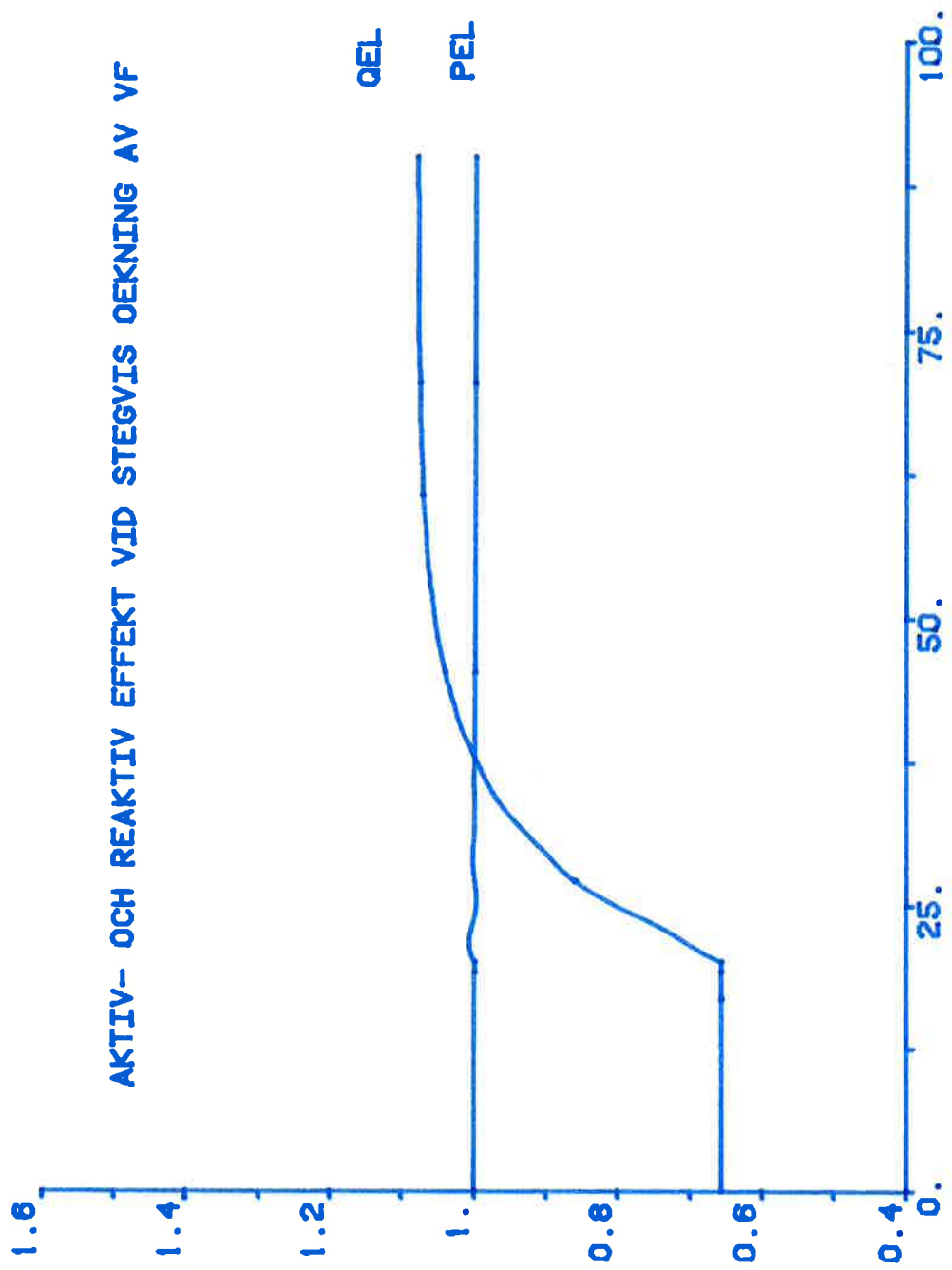
MODELL A-2



1960-03-20 13:59:58 NR 4  
HCOPY

MODELL A-3

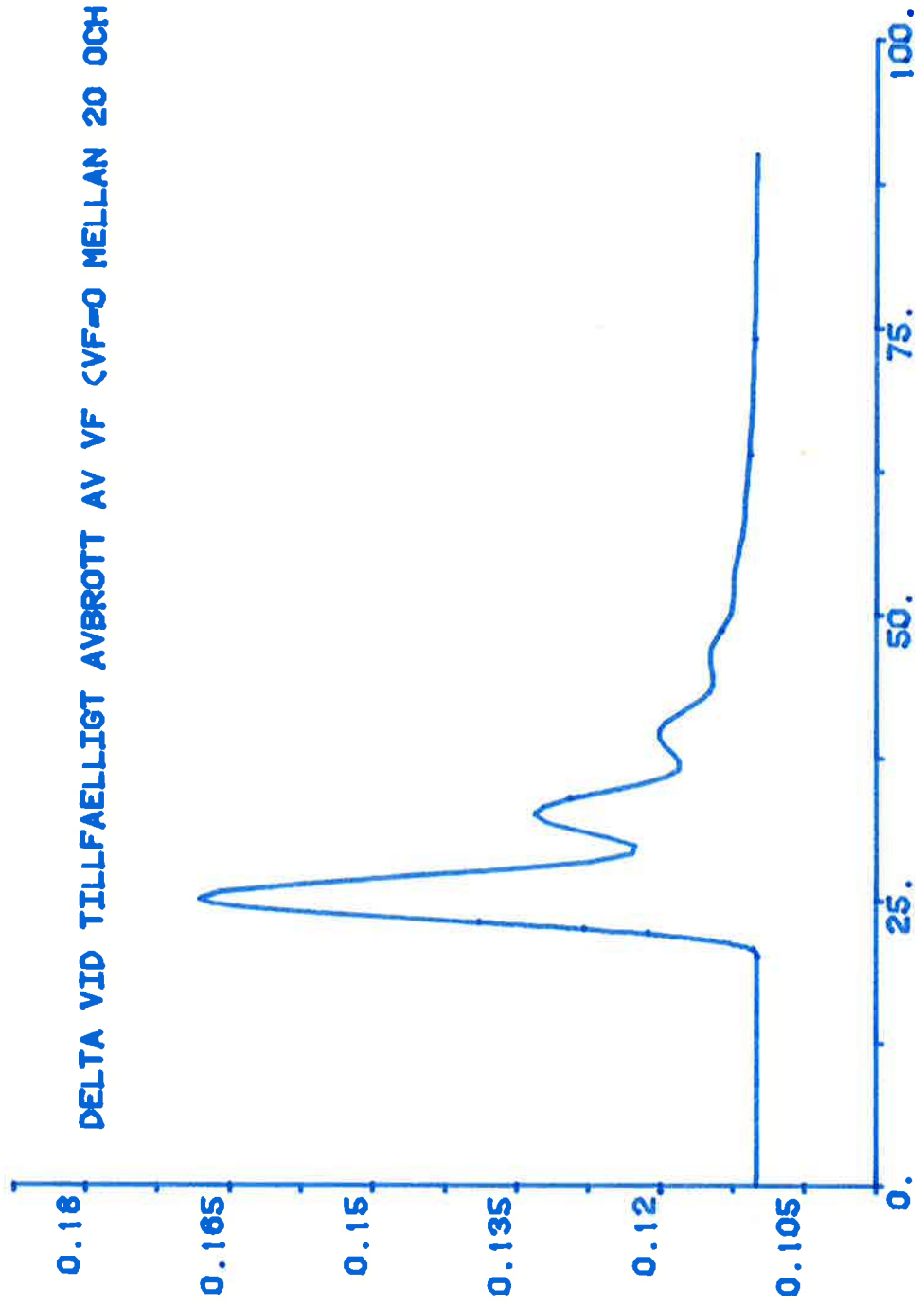
AKTIV- OCH REAKTIV EFFEKT VID STEGVIS OEKNING AV VF



1980-03-20 15:21:09 NR 10  
HCOPY

MODELL A-3

DELTA VID TILLFAELLLIGT AVBROTT AV VF (VF=0 MELLAN 20 OCH 29)



APPENDIX IVReferenser

- [1] E W Kimbark: Power System Stability Vol. III  
Wiley 1956
- [2] Nordanlycke, Paulsson, Wredenberg:  
Solution Methods of Power System Dynamics  
Elektromaskinlära KTH 1974
- [3] Karl-Erik Hallenius: Elektriska Maskiner
- [4] K Bonfert: Betriebsverhalten der Synchronmaschine  
Springer-Verlag 1962
- [5] Fitzgerhald, Kingsley: Electric Machinery  
McGraw-Hill
- [6] Elgerd: Electric Energy System Theory
- [7] T Byerly, E W Kimbark:  
Stability of Large Electric Power Systems  
IEEE Press 1974
- [8] F P de Mello, J R Ribeiro:  
Derivation of Synchronous Machine Parameters From Tests  
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems  
July/August 1977
- [9] Div. Laboratoriekurser  
Avd. för Elektroteknik LTH