

TILLSTÅNDESTIMERING I ELKRAFTSYSTEM

Bengt Neiderud

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET

UTLÅNAS EJ

RE - 126 juni 1973

TILLSTÅNDESTIMERING I ELKRAFTSYSTEM

Bengt Neiderud

SAMMANFATTNING

Ekvationerna för dynamisk tillståndsestimering med Kalmanfiltrering härleds och operationstiderna för olika varianter av Kalmanfiltrering uppskattas. Ett elkraftnät med fem knutpunkter och två generatorer simuleras med differentialekvationer för fasvinkel, luftgapseffekt, flöden samt spännings- och effektregulatorer som grund. Simulerade värden ur detta nät används sedan vid test av en statisk tillståndsestimator. Denna är konstruerad för sekventiell behandling av mätvärden efter samma principer som Kalmanfiltrering.

Handledare: Sture Lindahl

STATE ESTIMATION IN POWER SYSTEMS

ABSTRACT

The equations for a dynamical state estimation with Kalman-filtering are derived and the operation times for different variants of Kalman-filtering are estimated. An electrical power network with five nodes and two generators is simulated with differential equations for phase-angle, air-gap power, fluxes and voltage- and power-regulators. Simulated values from this network then are used by testing a static state estimator. This is constructed for sequential processing of measured values with the same principles as Kalman-filtering.

<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</u>	<u>Sida</u>
1. INLEDNING	1
2. FILTRERINGSTEORI	4
3. OPERATIONSTIDER	8
3.1. Fullständig Kalmanfiltrering	9
3.2. Reducerad Kalmanfiltrering med diagonal P-matris	11
4. MODELL OCH SIMULERING	17
4.1. Generatorekvationer på tillståndsform	18
4.2. Beräkningsgång för simulator	27
5. STATISK TILLSTÅNDESTIMERING	39
5.1. Beräkningsgång för estimator	39
5.2. Resultat av estimeringen	45
6. SLUTSATSER	53
7. REFERENSER	55
APPENDIX: Programlistningar	

1. INLEDNING

Övervakning och styrning av kraftsystem kräver kontinuerlig insamling och behandling av mätvärden. Dessa överförs via radiolänkar eller via kraftledningar, med hjälp av bärfrekvensteknik, till ett centralt kontrollrum. Här sitter operatörer som ansvarar dels för driftsäkerheten och dels för ekonomisk optimering av kraftproduktionen. Det inses lätt att operatörerna endast hinner kontrollera ett fåtal mätvärden i ett stort kraftsystem. Därför har man nu börjat ta datamaskiner till hjälp. Det finns två metoder att införa sådana i ett kraftsystem, men idag används huvudsakligen den ena. Enligt denna lagrar datamaskinen alla tillgängliga mätvärden och gör en tillståndsestimering med utgångspunkt från dessa värden. Systemets tillstånd kan beskrivas av knutpunkternas spänningar och fasvinklar och från dessa kan sedan övriga mätstorheter beräknas. Tillstånden behöver alltså inte vara utdata från datamaskinen utan utgör snarare räknestorheter. Dessa beräkningar ger en noggrann och tillförlitlig beskrivning av systemet eftersom hänsyn tas till varianser och bortfall av enskilda mätvärden inte innebär att motsvarande mätstorhet ej kan rekonstrueras. Värden som på detta sätt beräknats utgör sedan databas för reelltidsövervakning. Den andra metoden innebär att datamaskinen även centralt styr kraftsystemet.

Redan idag används ADB-rutiner för produktionsplanering, kraftavräkning, driftstatistik och nät driftplanering i Sverige. Dessa rutiner ger besked om vad som hände förra dygnet och en prognos om vad som kommer att hända nästa dygn eller senare. Näten blir emellertid mer och mer komplicerade både tekniskt och ekonomiskt, och i framtiden krävs reelltidsövervakning för att säkerställa driften och minimera kostnaderna. För detta planeras i Sverige ett datasystem, som var femtonde sekund samlar in omkring 600 mätvärden från ca 200 stationer. Dessutom skall ca 700 indikeringar med högre prioritet kunna nå kontrollrummet. Datamaskinen skall lagra data och presentera kraftsystemets tillstånd på ett överskådligt och lättfattligt sätt. Den

ges även en kontrollerande funktion, som ger larm vid risk för överbelastning, instabilitet och kraftbrist. Nätssäkerheten skall beräknas för varje driftsfall, dvs man kontrollerar vad som händer vid generatorbortfall eller fel på ledningar och transformatorer. En annan viktig kontrollfunktion är den ekonomiska optimeringen, som innebär att produktionen fördelas på de olika energikällorna på ett sätt som ger lägsta produktionskostnad. De mest betydelsefulla energikällorna är idag vattenkraft, konventionell värmekraft och kärnkraft.

I detta arbete har vi valt att låta de komplexa spänningarna vid knutpunkterna beskriva systemets tillstånd. Spänningarna kan beräknas enligt Newton-Raphsons lastfördelningsberäkning [5], om spänningen vid en knutpunkt och de komplexa injicerade effekterna vid övriga knutpunkter är kända. Övriga spänningar och effekter utnyttjas inte. En statisk tillståndsestimator enligt minsta-kvadrat-metoden [3] använder däremot även en del redundanta (överskotts-) mätningar och minskar på så vis standardavvikelsen av de estimerade värdena. Dessa ger alltså ett noggrannare besked om i vilket tillstånd systemet befinner sig, på grund av redundanta mätningar och eftersom mätvärdena inte antages vara exakta i denna metod. Vid system av storleksordningen ett par hundra knutpunkter är emellertid minsta-kvadrat-metoden för långsam. I stället behandlas mätvärdena med reducerad Kalmanfiltrering, där Φ ersatts med enhetsmatrisen och kovariansmatriserna är diagonala [4]. I de båda sistnämnda metoderna kan den matematiska modellen kombineras med alla tänkbara mätvärden. Även dåliga mätvärden kan behandlas eftersom varianserna ingår i beräkningarna. Kravet på snabbhet medför dock att endast den väsentligaste informationen kan medtagas. En tillståndsestimator kan även beräkna värden som inte är direkt mätbara eller svåra att mäta t. ex. relativa fasvinkeln mellan knutpunkter. Dessutom kan den avgöra om ett mätvärde är rimligt och om så inte är fallet utesluta det. Den klarar alltså även mätbortfall, vilket inte Newton-Raphsons lastfördelningsberäkning gör.

Avsnitt 2 behandlar teorin för Kalmanfiltrering. För att få en uppfattning om hur lång tid olika varianter av Kalmanfiltrering tar beräknas operationstider i avsnitt 3. I avsnitt 4 beskriver vi hur mätvärden simuleras i ett litet kraftnät med fem knutpunkter och två generatorer. Mätvärdena används sedan vid den statistiska tillståndsestimeringen i avsnitt 5.

2. FILTERERINGSTEORI

I många praktiska fall är det inte möjligt att direkt mäta samtliga tillstånd i ett system. Detta trots att systemet är observerbart. Det är alltså nödvändigt att rekonstruera tillståndsvariabler. Antag att vi har ett dynamiskt system

$$x(t+1) = \phi x(t) + \Gamma u(t) + v(t) \quad (1)$$

$$y(t) = \theta x(t) + e(t) \quad (2)$$

där $v(t)$ och $e(t)$ är brusvektorer med kovarianserna R_1 respektive R_2 . Tillståndsvektorn $x(t_0)$ har kovariansmatrisen R_0 . Vi försöker nu rekonstruera systemet med

$$\hat{x}(t+1) = \phi \hat{x}(t) + \Gamma u(t) \quad (3)$$

Insignalen till det dynamiska systemet utnyttjas alltså även av rekonstruktorn. Om $y(t)$ jämföres med $\theta \hat{x}(t)$ fås ett mått på hur bra rekonstruktorn (3) arbetar. Detta kan användas för att förbättra den. Vi får då

$$\hat{x}(t+1) = \phi \hat{x}(t) + \Gamma u(t) + K(y(t) - \theta \hat{x}(t)) \quad (4)$$

där K är en lämpligt vald matris.

För att bestämma $K=K(t)$ betraktar vi rekonstruktionsfelet $\tilde{x} = x - \hat{x}$, som fås genom att subtrahera (4) från (1)

$$\tilde{x}(t+1) = \phi \tilde{x}(t) + v(t) - K(y(t) - \theta \hat{x}(t))$$

och insättning av (2) ger

$$\tilde{x}(t+1) = (\phi - K\theta) \tilde{x}(t) + v(t) - Ke(t) \quad (5)$$

Det gäller nu att till en godtycklig konstant vektor a finna en sekvens av K -matriser så att skalärprodukten $a^T x$ minimeras i minsta-kvadrat-metodens mening. Vi beräknar först medelvärde och varians av $x(t)$. Medelvärdet ges av

$$E\tilde{x}(t+1) = (\phi - K\theta)E\tilde{x}(t) \quad (6)$$

och om $E\tilde{x}(t_0) = m$ och $\hat{x}(t_0) = m$ fås

$$E\tilde{x}(t) = 0$$

dvs rekonstruktionsfelet har medelvärdet noll oberoende av hur K väljes. Variansen av $\tilde{x}(t)$ blir

$$P(t) = E\tilde{x}(t)\tilde{x}^T(t)$$

eller om $\tilde{x}(t)$ insättes

$$P(t+1) = (\phi - K\theta)P(t)(\phi - K\theta)^T + R_1 + KR_2K^T \quad (7)$$

$$P(t_0) = R_0$$

K -matrisen väljs nu så att variansen av $a^T x$ minimeras.

$$E(a^T \tilde{x})^2 = E a^T \tilde{x} \tilde{x}^T a = a^T (E \tilde{x} \tilde{x}^T) a = a^T P(t) a$$

Vi får med hjälp av (7)

$$\begin{aligned} a^T P(t+1) a &= a^T (\phi P(t) \phi^T + R_1 - K \theta P(t) \phi^T - \phi P(t) \theta^T K^T + \\ &\quad + K(R_2 + \theta P(t) \theta^T) K^T) a \end{aligned} \quad (8)$$

Högra ledet är en kvadratisk funktion av K och kvadratkompletering ger

$$\begin{aligned} a^T P(t+1) a &= a^T (\phi P(t) \phi^T + R_1 - \phi P(t) \theta^T (R_2 + \theta P(t) \theta^T)^{-1} \theta P(t) \phi^T) a + \\ &\quad + a^T (K - \phi P(t) \theta^T (R_2 + \theta P(t) \theta^T)^{-1}) (R_2 + \theta P(t) \theta^T) \cdot \\ &\quad \cdot (K - \phi P(t) \theta^T (R_2 + \theta P(t) \theta^T)^{-1})^T a \end{aligned} \quad (9)$$

Vi ser nu att första termen av (9) är oberoende av K , medan

den andra är kvadratisk i K och alltså större än eller lika med noll. Minimum får vi således då andra termen är lika med noll, vilket medför att K skall väljas

$$K(t) = \Phi P(t) \Theta^T (R_2 + \Theta P(t) \Theta^T)^{-1} \quad (10)$$

och samtidigt bestämmas variansen för $\hat{x}(t+1)$

$$P(t+1) = \Phi P(t) \Phi^T + R_1 - \Phi P(t) \Theta^T (R_2 + \Theta P(t) \Theta^T)^{-1} \Theta P(t) \Phi^T \quad (11)$$

$$P(t_0) = R_0$$

Vi har nu härlett en modell för rekonstruktion av tillståndsvariabler, som är optimal i minsta-kvadrat-metodens mening. Detta gäller alltid då bruset är gaussiskt. Vid annan fördelning av bruset är metoden fortfarande optimal, om vi inskränker oss till linjära system och om estimaten är linjära funktioner av mätsignalerna. Ekvation (4) med uttryck på $K(t)$ och $P(t+1)$ enligt (10) respektive (11)

$$\hat{x}(t+1) = \Phi \hat{x}(t) + \Gamma u(t) + K(y(t) - \Theta \hat{x}(t)) \quad (4)$$

$$K(t) = \Phi P(t) \Theta^T (R_2 + \Theta P(t) \Theta^T)^{-1} \quad (10)$$

$$P(t+1) = \Phi P(t) \Phi^T + R_1 - \Phi P(t) \Theta^T (R_2 + \Theta P(t) \Theta^T)^{-1} \Theta P(t) \Phi^T \quad (11)$$

kallas Kalmanfilter. Detta behandlas utförligare i referens [1].

I avsnitt 5 kommer vi att estimerat tillstånd i ett system som kan beskrivas

$$x(t+1) = x(t) + e(t)$$

$$y(t) = \Theta x(t) + v(t)$$

Då vill vi använda en variant av Kalmanekvationerna, där vi bytt ut Φ mot enhetsmatrisen. Vi kallar denna variant för reducerad Kalmanfiltrering. Denna metod är emellertid inte identisk med dynamisk tillståndsestimering (=Kalmanfiltrering) annat än då Φ i verkligheten är lika med enhetsmatrisen.

Trots detta kan man finna att vissa tidskrifter felaktigt benämner metoden dynamisk tillståndsestimering.

3. OPERATIONSTIDER

Tillståndsestimering i elkraftsystem fordrar snabba algoritmer beroende på den stora mängd mätvärden som måste behandlas inom snäva tidsgränser. Detta för att tillgodose kraven på noggrannhet och aktualitet. Eftersom både matrisinvertering och matrismultiplikation förekommer så ökas operationstiden kraftigt med ökat antal tillstånd och ökad redundans (antalet mätvärden/ antalet tillstånd). Därför uppskattas här operationstider vid olika varianter av Kalmanfiltrering, för att bedöma metodernas användbarhet. Grundekvationer vid beräkningarna är formlerna för fullständig Kalmanfiltrering [2] :

$$\hat{x}(t+1|t) = \phi(t+1|t)\hat{x}(t|t-1) + \Gamma(t)u(t) + \\ + K(t)(y(t) - \hat{y}(t|t-1))$$

$$\hat{y}(t|t-1) = \Theta(t)\hat{x}(t|t-1)$$

$$u(t+1) = -L(t+1)\hat{x}(t+1|t)$$

$$K(t) = (\phi(t+1|t)P(t)\Theta^T(t) + R_{12}(t))(\Theta(t)P(t)\Theta^T(t) + R_2(t))^{-1}$$

$$P(t+1) = \phi(t+1|t)P(t)\Psi^T(t+1|t) + R_1(t) - R_{12}(t)K^T(t)$$

$$\Psi(t+1|t) = \phi(t+1|t) - K(t)\Theta(t)$$

I fortsättningen antar vi att $u(t)=0$. Vektorn $y(t)$ innehåller m mätvärden och n betecknar antalet tillstånd. Redundansen betecknas η ($=m/n$).

3.1. Fullständig Kalmanfiltrering

Beräkningssekvens enligt [2].

Beräkningssekvens	Operationer		Minne
	Mult	+Add	
1 ϕ			n^2
2 θ			mn
3 R_1			n^2
4 R_{12}			mn
5 R_2			m^2
6 y			m
7 $\hat{x}(t t-1)$			n
8 $P(t)$			n^2
9 $e(t)=y(t)-\theta(t)\hat{x}(t t-1)$	mn	$+mn$	Lagra i 6
10 $P(t)\theta^T(t)$	n^2m	$+mn(n-1)$	mn
11 $R_y=\theta(t)P(t)\theta^T(t)+R_2(t)$	m^2n	$+m^2n$	m^2
12 R_y^{-1}	$m^3/2+3m^2/2+3m$		Lagra i 11
13 $t=e^T(t)R_y^{-1}e(t)$	m^2+m	$+m^2$	1
14 $K(t)=(\phi(t+1 t)P(t)\theta^T(t)+R_{12}(t))R_y^{-1}$	$n^2m+m^2n+nm(n+m-1)$		Lagra i 2
15 $\hat{x}(t+1 t)=\phi(t+1 t)\hat{x}(t t-1)+K(t)e(t)$	n^2+nm	$+n(n+m-2)$	Lagra i 7
16 $\Psi(t+1 t)=\phi(t+1 t)-K(t)\theta(t)$	n^2m	$+n^2m$	n^2
17 $R_{12}(t)K^T(t)$	n^2m	$+n^2(m-1)$	n^2
18 $P(t)\Psi^T(t+1 t)$	n^3	$+n^2(n-1)$	Lagra i 8
19 $P(t+1)=\phi(t+1 t)P(t)\Psi^T(t+1 t)+R_1(t)-R_{12}(t)K^T(t)$	n^3	$+n^2(n+1)$	Lagra i 8

Tabell 3.1 - Operationstid och minnesbehov vid fullständig Kalmanfiltrering.

Antal operationer: $m(n(8n+4m+2)+4+m(7+m)/2)+n(n(4n+1)-2)$

Antal minnesceller: $m(3n+2m+1)+n(5n+1)$

Om i stället beräkningarna utföres med diagonal P-matris och $R_{12}=0$ fås följande behov av operationstid och minne med samma beräkningssekvenser som i tabell 3.1.

Beräkningssekvens	Operationer		Minne
	Mult	+Add	
1			n^2
2			mn
3			n
4			0
5			m
6			m
7			n
8			n
9	mn	$+mn$	Lagra i 6
10	mn		mn
11	mn	$+mn$	m
12	m		Lagra i 11
13	$2m$	$+m$	1
14	n^2_{m+mn}	$+n^2_{m-mn}$	Lagra i 2
15	n^2_{+mn}	$+n(n+m-2)$	Lagra i 7
16	n^2_m	$+n^2_m$	n^2
17			0
18	n^2		Lagra i 8
19	n^2	$+n^2$	Lagra i 8

Tabell 3.2 - Antal operationer och minnesbehov vid Kalman-filtrering med diagonal P-matris.

Antal operationer: $m(n(4n+7)+4)+n(5n-2)$

Antal minnesceller: $(m+n)(2n+3)$

Operationstiden som funktion av antalet tillstånd och redundans, när beräkningarna utföres med Univac 1108, visas i diagram 3.1. Detta visar att operationstiderna oftast blir för långa även om beräkningarna utföres med diagonal P-matris.

3.2. Reducerad Kalmanfiltrering med diagonal P-matris

I många fall kan man anta att ett system är kvasi-stationärt och sätta ϕ lika med enhetsmatrisen. Ekvationerna för tillståndsestimatorn blir då

$$\hat{x}(t+1|t) = \hat{x}(t|t-1) + K(t)(y(t) - \hat{y}(t|t-1))$$

$$\hat{y}(t|t-1) = \theta(t)\hat{x}(t|t-1)$$

$$K(t) = P(t)\theta^T(t)(\theta(t)P(t)\theta^T(t) + R_2(t))^{-1}$$

$$P(t+1) = P(t)(I - \theta^T(t)K^T(t)) + R_1(t)$$

Av tabell 3.3 framgår antalet operationer och behov av minne vid reducerad Kalmanfiltrering med diagonal P-matris.

Beräkningssekvens	Operationer		Minne
	Mult	+Add	
1 θ			mn
2 R_1			n
3 R_2			m
4 y			m
5 $\hat{x}(t t-1)$			n
6 $P(t)$			n
7 $e(t) = y(t) - \theta(t)\hat{x}(t t-1)$	mn	$+mn$	Lagra i 4
8 $P(t)\theta^T(t)$	mn		mn
9 $R_y = \theta(t)P(t)\theta^T(t) + R_2(t)$	mn	$+mn$	m
10 R_y^{-1}	m		Lagra i 9
11 $t = e^T(t)R_y^{-1}e(t)$	$2m$	$+m$	1
12 $K(t) = P(t)\theta^T(t)R_y^{-1}$	mn		Lagra i 1
13 $\hat{x}(t+1 t) = \hat{x}(t t-1) + K(t)e(t)$	mn	$+mn$	Lagra i 5
14 $I - \theta^T(t)K^T(t)$	mn	$+mn$	Lagra i 1
15 $P(t+1) = P(t)(I - \theta^T(t)K^T(t)) +$ $+ R_1(t)$	n	$+n$	Lagra i 6

Tabell 3.3 - Antal operationer och minnesbehov vid reducerad Kalmanfiltrering med diagonal P-matris.

Antal operationer: $2(m(5n+2)+n)$

Antal minnesceller: $m(2n+3)+3n$

Eftersom θ -matrisen vid tillståndsestimering i kraftsystem ofta till största delen består av nollor förkortas operationstiden avsevärt om beräkningarna utföres med algoritmer för behandling av glesa matriser. Fallet då endast 10% av elementen i θ -matrisen är skilda från noll visas i tabell 3.4, där be-

räkningssekvenserna är ekvivalenta med dem i tabell 3.3.

Beräkningssekvens	Operationer		Minne
	Mult	+Add	
1			0.1mn
2			n
3			m
4			m
5			n
6			n
7	0.1mn	+0.1mn	Lagra i 4
8	0.1mn		0.1mn
9	0.1mn	+0.1mn	m
10	m		Lagra i 9
11	2m	+m	1
12	0.1mn		Lagra i 1
13	0.1mn	+0.1mn	Lagra i 5
14	0.1mn	+0.1mn	Lagra i 1
15	n	+n	Lagra i 6

Tabell 3.4 - Antal operationer och minnesbehov vid reducerad Kalmanfiltrering med diagonal P-matris och gles Θ -matris (10%).

Antal operationer: $m(n+4)+2n$

Antal minnesceller: $m(0.2n+3)+3n$

Behovet av minnesceller blir i verkligheten något större eftersom behandlingen av glesa matriser kräver att information lagras om vilka element som är skilda från noll. Diagram 3.2

visar operationstiden som funktion av antal tillstånd och redundans, när beräkningarna utföres med Univac 1108.

Vid jämförelse av diagrammen inses att fullständig Kalmanfiltrering är en alltför långsam metod även om beräkningarna utföres med diagonal P-matris. Kravet är att beräkningarna skall utföras på mindre än ca 15 sek och i ett elkraftsystem skall kanske 200 tillstånd estimeras med en redundans (η) lika med 3-4. Metoden med reducerad Kalmanfiltrering ger däremot rimliga operationstider, men det återstår att kontrollera noggrannheten.

Diagram 3.1 - Fullständig Kalmanfiltrering.
 Operationstiden som funktion av antal till-
 stånd och redundans. Univac 1108.

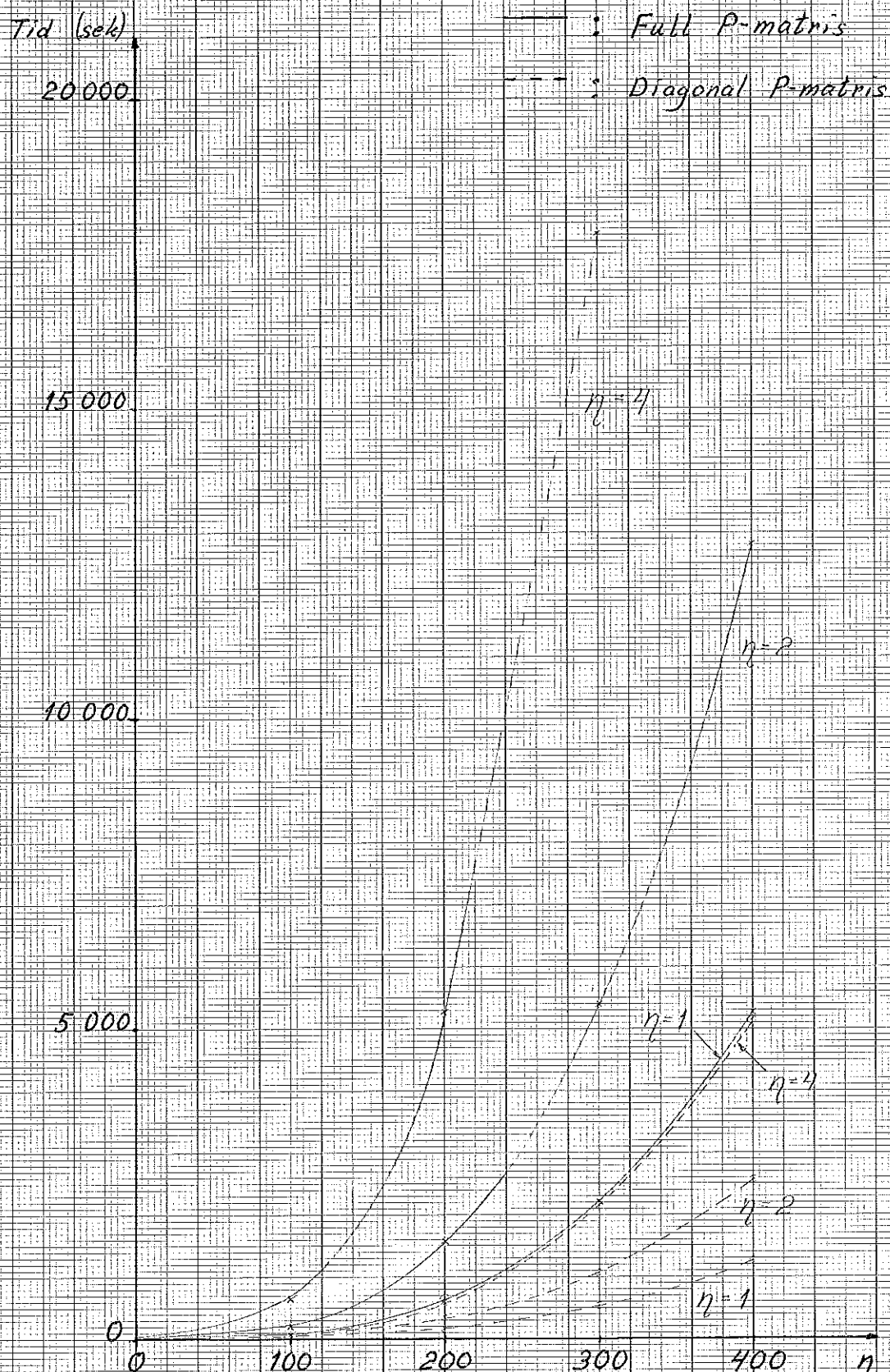
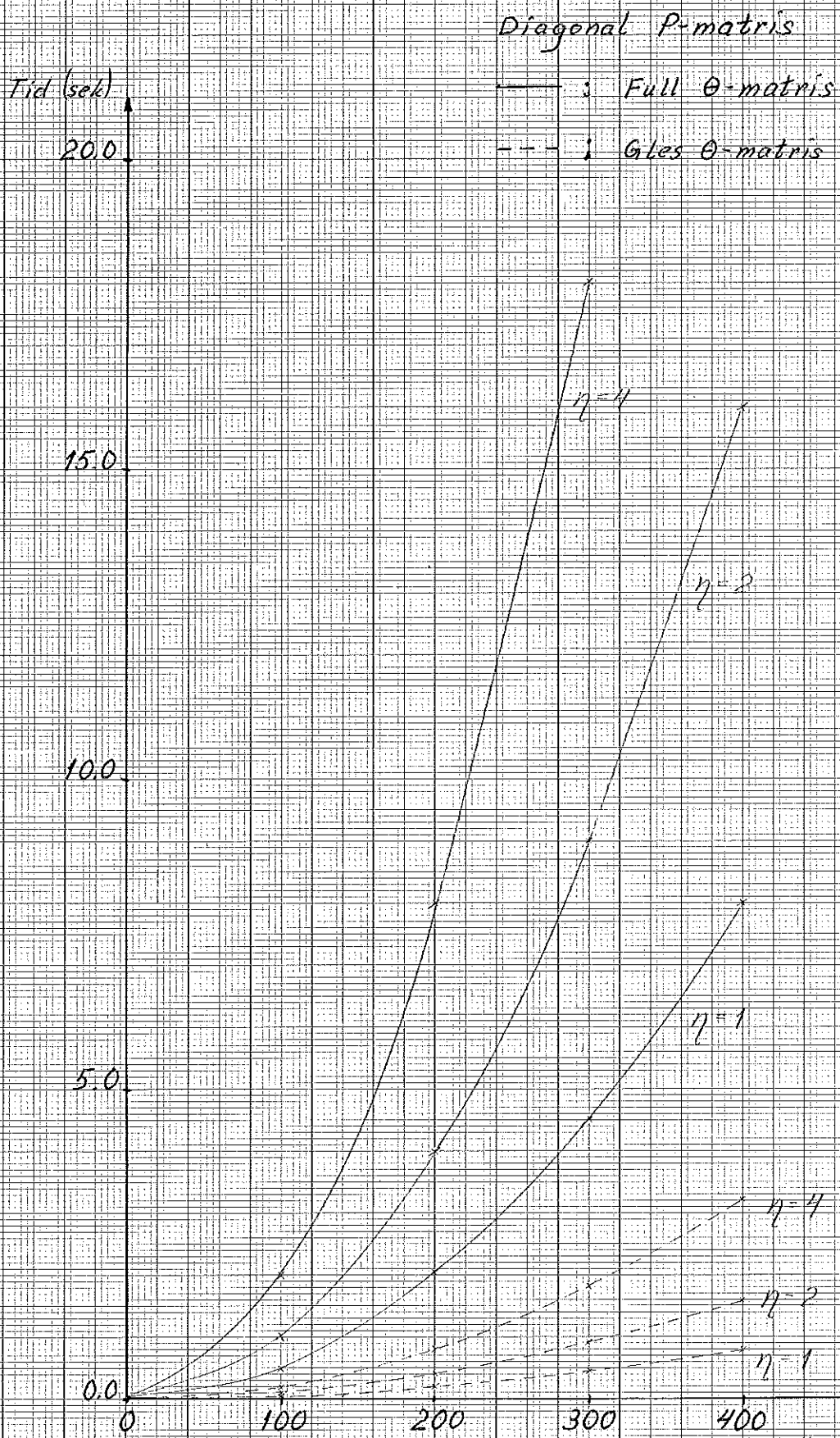
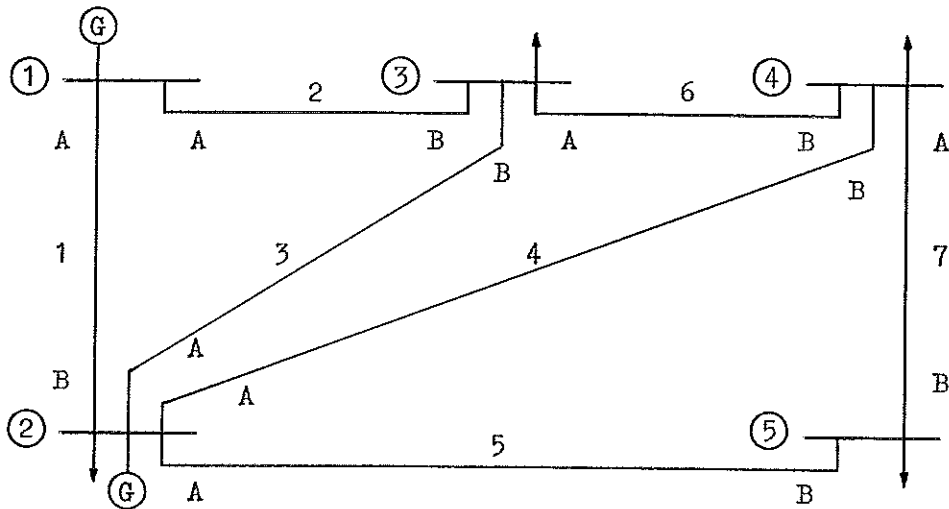


Diagram 3.2 - Reducerad Kalmanfiltrering.
 Operationstiden som funktion av antal till-
 stånd och redundans. Univac 1108.



4. MODELL OCH SIMULERING

För att kunna testa tillståndsestimatorn, som beskrives i nästa avsnitt, fordras tillgång till mätvärden från ett kraftnät. Vi har valt att själva simulera ett litet kraftnät med fem knutpunkter och två generatorer enligt figur 4.1.



Figur 4.1 - Kraftnät vid simuleringen.

Vanligtvis brukar man använda en simuleringsmodell som är precis lik estimatormodellen. Vi försöker i stället konstruera en modell som kan simulera ett elkraftsystem så noggrannt som möjligt. Därför låter vi ekvationerna för generatorerna ligga till grund för simuleringen. Dessa beskriver luftgapseffekt, flöden fasvinkel samt spännings- och effekttregulator. Vid simuleringen betraktar vi knutpunkt ett som referens med fasvinkeln noll. Alla laster antas konstanta utom vid knutpunkt fem, där lasten varierar längs en ramp med pålagt brus med en korrelation som är karakteristisk för elkraftnät. Denna variation av lasten ger reglerverkan i regulatorerna och rotorerna pendlar. Fördelen med att generera mätvärden på detta sätt är att tillståndsbruset vid estimeringen introduceras på ett naturligt sätt och inte är godtyckligt valt. Enligt dessa principer har oss veterligt ingen tidigare konstruerat en simulator.

Transmissionsnätet beskrivs av den komplexa knutpunktsadmittansmatrisen Y , som erhålles från lastfördelningsberäkningen enligt [5]. Se appendix D. Belastningarna omräknas till admittanser (som varierar i enlighet med lasten).

4.1. Generatorekvationer på tillståndsform

Utgångsekvationer för härledning av generatorekvationer på tillståndsform har varit följande differentialekvationer, som härletts i referens [6].

4.1.1. Fysikaliska grundekvationer

Synkronmaskinens rörelseekvation kan formuleras

$$J \frac{dw}{dt} = M_m - M_e$$

om vi bortser från förluster. Uttryckt i effekter fås i stället

$$Jw \frac{dw}{dt} = P_m - P_e$$

och om hänsyn tages till dämpning och mekaniska förluster

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} ((P_m - P_e)/w - D(w - w_0))$$

Med utgångspunkt från uttrycken på inducerad emk i trefasmaskin med generatorreferenser

$$v_r = r_a i_r + d\psi_r/dt$$

$$v_s = r_a i_s + d\psi_s/dt$$

$$v_t = r_a i_t + d\psi_t/dt$$

$$v_f = r_f i_f + d\psi_f/dt$$

fås genom transformation till dq-maskin enligt [6] med motor-referenser

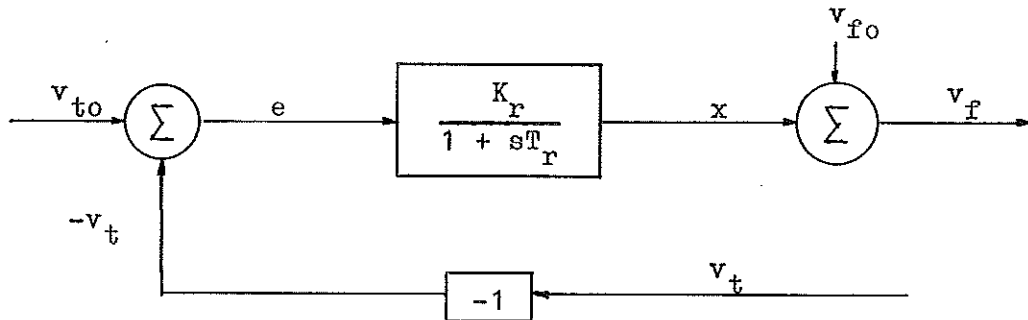
$$d\psi_f/dt = v_f - i_f r_f$$

$$d\psi_d/dt = v_d + r_a i_d + w\psi_q$$

$$d\psi_q/dt = v_q + r_a i_q - w\psi_d$$

Det bör observeras att härledningarna i [6] sker med generator-referenser men vi i fortsättningen kommer att räkna med motor-referenser.

Spänningsregulatorerna antages vara linjära och av första ordningen.



Figur 4.2 - Spänningsregulator.

$$x = eK_r / (1 + sT_r)$$

och enkel omvandling ger

$$\frac{dx}{dt} = (-x + eK_r) / T_r$$

Insättes $x = v_f - v_{fo}$ och $e = v_{to} - v_t$ får vi

$$\frac{dv_f}{dt} = (v_{fo} - v_f + K_r(v_{to} - v_t)) / T_r$$

där

v_f = fältspänning

v_t = generatorns klämspänning

K_r = förstärkningsparameter

T_r = tidskonstant

index o står för referensvärden.

Effektregulatorerna fås genom att byta

v_f mot P_m = inmatad mekanisk effekt

v_t mot w = vinkelhastighet

K_r mot K_g = förstärkningsparameter

T_r mot T_g = tidskonstant

$$\frac{dP_m}{dt} = (P_{m0} - P_m + K_g(w_0 - w))/T_g$$

Vi sammanställer nu ovan härledda differential-ekvationer och tillfogar formeln för fasvinkelns derivata

$$\frac{d\theta}{dt} = w - w_0 \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} ((P_m - P_e)/w - D(w - w_0)) \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = v_f - r_f i_f \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_d}{dt} = v_d + r_a i_d + w\psi_q \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = v_q + r_a i_q - w\psi_d \quad (5)$$

$$\frac{dv_f}{dt} = (v_{fref} - v_f + K_r(v_{tref} - \sqrt{v_d^2 + v_q^2}))/T_r \quad (6)$$

$$\frac{dP_m}{dt} = (P_{mref} - P_m + K_g(w_{ref} - w))/T_g \quad (7)$$

Följande statistiska samband finns härledda i [6]:

$$P_e = wM_e = w\psi_d i_q - w\psi_q i_d \quad (8)$$

$$\psi_f = (X_{ff} i_f - X_{af} i_d)/w_0 \quad (9)$$

$$\psi_d = (X_{af}i_f - X_d i_d)/w_o \quad (10)$$

$$\psi_q = -X_q i_q/w_o \quad (11)$$

Teckenförklaringar:

w_o = synkrona vinkelhastigheten

J = tröghetsmoment för turbin och generator

P_m = inmatad mekanisk effekt

M_m = inmatat mekaniskt moment

P_e = luftgapseffekt

M_e = luftgapmoment

D = dämpningskoefficient som motsvarar effektförlusterna i dämplindning och mekaniska förluster [6]

ψ_f, ψ_d, ψ_q = flöden i dq-maskin [6]

v_f, v_d, v_q = spänningar i dq-maskin [6]

i_f = ström i fältlindning

r_f = resistans i fältlindning

r_a = ankarresistans

L_{ff} = fältlindningens självinduktans

L_{af} = ömsesidiga induktansen mellan statorns d-axel-lindning och fältlindningen

L_d = statorns d-axel-lindnings självinduktans

L_q = statorns q-axel-lindnings självinduktans

K_r = förstärkningsparameter för spänningsregulator

K_g = förstärkningsparameter för effektregulator

T_r = tidskonstant för spänningsregulator

T_g = tidskonstant för effektregulator

4.1.2. Approximationer

Vi antar att tidsderivatorna av ψ_d och ψ_q båda är noll samt att ankarresistansen är försumbar. Då blir ekvationerna (1)-(3) och (6)-(7) oförändrade, medan ekvationerna (4) och (5) ger

$$v_d = -w\Psi_q \quad (12)$$

$$v_q = w\Psi_d \quad (13)$$

4.1.3. Normaliseringar

Vi skall nu normalisera de ingående variablerna så att motsvarande tillståndsvariabel blir dimensionslös och har sitt stationära värde nära ett. Rotorvinkeln räknar vi även i fortsättningen i radianer. Rotorns vinkelhastighet normaliseras med w_o och fältflödet med Ψ_{fo} , där Ψ_{fo} ger märkspänning vid tomgång. På samma sätt normaliseras v_f med v_{fo} svarande mot Ψ_{fo} . Mekanisk effekt normaliseras med märkeffekten P_b .

Vid stationär tomgång gäller sambanden

$$\Psi_{fo} = X_{ff}i_{fo}/w_o$$

$$\Psi_{do} = X_{af}i_{fo}/w_o$$

$$\Psi_{qo} = 0$$

$$v_d = -w_o\Psi_{qo}$$

$$v_q = w_o\Psi_{do}$$

vilka medför

$$i_{fo} = \frac{\Psi_{fo}w_o}{X_{ff}}$$

$$i_{fo} = \frac{\Psi_{do}w_o}{X_{af}}$$

$$v_d = 0$$

$$v_q = v_b$$

där v_b är märkspänning.

Tillståndsvariablerna blir då

$$x_1 = \theta$$

$$x_2 = w/w_0$$

$$x_3 = \Psi_f/\Psi_{fo}$$

$$x_4 = v_f/v_{fo}$$

$$x_5 = P_m/P_b$$

Med dessa tillståndsvariabler blir differentialekvationerna

$$\frac{dx_1}{dt} = w - w_0 = w_0(w/w_0 - 1) = w_0(x_2 - 1) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_2}{dt} &= \frac{1}{Jw_0} \left((P_b \frac{P_m}{P_b} - P_b \frac{P_e}{P_b}) \frac{w_0}{w} \frac{1}{w_0} - D \frac{w_0^2}{w_0} \left(\frac{w}{w_0} - 1 \right) \right) = \\ &= 0.5 \left((x_5 - \frac{P_e}{P_b}) / x_2 - D_1 (x_2 - 1) \right) / H \end{aligned} \quad (15)$$

där

$$H = \frac{Jw_0^2}{2P_b} \quad (\text{tröghetskonstanten})$$

$$D_1 = \frac{Dw_0^2}{P_b}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_3}{dt} &= \frac{v_{fo}(v_f/v_{fo}) - r_f i_{fo}(i_f/i_{fo})}{\Psi_{fo}} = \frac{v_{fo}(v_f/v_{fo}) - r_f i_{fo}(i_f/i_{fo})}{L_{ff} i_{fo}} = \\ &= (x_4 - (i_f/i_{fo})) / T_{do} \end{aligned} \quad (16)$$

där $T_{do} = L_{ff}/r_f$

$$\begin{aligned} \frac{dx_4}{dt} &= \left(\frac{v_{fref}}{v_{fo}} - \frac{v_f}{v_{fo}} + \frac{K_r v_b}{v_{fo}} \left(\frac{v_{tref}}{v_b} - \frac{\sqrt{v_d^2 + v_q^2}}{v_b} \right) \right) / T_r = \\ &= (u_{1ref} - x_4 + K_1 (y_{1ref} - y_1)) / T_r \end{aligned} \quad (17)$$

där

$$u_{1ref} = v_{fref}/v_{fo}$$

$$y_{1ref} = v_{tref}/v_b$$

$$K_1 = K_r v_b / v_{fo}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_5}{dt} &= \left(\frac{P_{mref}}{P_b} - \frac{P_m}{P_b} + \frac{K_g w_o}{P_b} \left(\frac{w_{ref}}{w_o} - \frac{w}{w_o} \right) \right) / T_g = \\ &= (u_{2ref} - x_5 + K_2 (y_{2ref} - y_2)) / T_g \end{aligned} \quad (18)$$

där

$$u_{2ref} = P_{mref}/P_b$$

$$y_{1ref} = w_{ref}/w_o$$

$$K_1 = K_g w_o / P_b$$

Ur ekvation (8)-(11) fås

$$\begin{aligned} \frac{P_e}{P_b} &= \frac{wM_e}{P_b} = \frac{w\psi_d i_q - w\psi_q i_d}{v_b i_b} = \frac{v_q i_q + v_d i_d}{v_b i_b} = \\ &= \left(\frac{v_q}{v_b} \frac{i_q}{i_b} + \frac{v_d}{v_b} \frac{i_d}{i_b} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \psi_f w_o = X_{ff} i_f - X_{af} i_d \\ \psi_d w_o = X_{af} i_f - X_d i_d \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} i_f = \frac{X_d}{X_{ff} X_d - X_{af}^2} \psi_f w_o - \frac{X_{af}}{X_{ff} X_d - X_{af}^2} \psi_d w_o \\ i_d = \frac{X_{af}}{X_{ff} X_d - X_{af}^2} \psi_f w_o - \frac{X_{ff}}{X_{ff} X_d - X_{af}^2} \psi_d w_o \end{cases}$$

$$\frac{i_f}{i_{fo}} = \frac{X_d X_{ff}}{X_{ff} X_d - X_{af}^2} \frac{\psi_f}{\psi_{fo}} - \frac{X_{af} X_{ff}}{X_{ff} (X_{ff} X_d - X_{af}^2)} \frac{\psi_d}{\psi_{do}}$$

Sätt

$$X'_d = X_d - \frac{X_{af}^2}{X_{ff}} = \frac{X_d X_{ff} - X_{af}^2}{X_{ff}} \Rightarrow X_{af}^2 = X_{ff}(X_d - X'_d)$$

Vi får nu

$$\begin{aligned} \frac{i_f}{i_{fo}} &= \frac{X_d}{X'_d} \frac{\psi_f}{\psi_{fo}} - \frac{X_d - X'_d}{X'_d} \frac{\psi_d}{\psi_{do}} \frac{w_o}{w_o} \frac{w}{w} = \\ &= \frac{X_d}{X'_d} x_3 - \frac{X_d - X'_d}{X'_d} \frac{v_q}{v_b} \frac{1}{x_2} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{i_d}{i_b} &= \frac{X_{af} \psi_{fo} w_o}{X_{ff} X'_d i_b} \frac{\psi_f}{\psi_{fo}} - \frac{1}{X'_d} \frac{\psi_{do} w_o}{i_b} \frac{\psi_d}{\psi_{do}} = \\ &= \frac{X_{af} X_{ff} i_{fo} w_o}{X_{ff} X'_d i_b w_o} \frac{\psi_f}{\psi_{fo}} - \frac{v_b}{i_b} \frac{1}{X'_d} \frac{\psi_d}{\psi_{do}} = \\ &= \frac{X_{af} w_o \psi_{do}}{X'_d X_{af} i_b} \frac{\psi_f}{\psi_{fo}} - \frac{z_b}{X'_d} \frac{\psi_d}{\psi_{do}} = \\ &= \frac{v_b}{i_b} \frac{1}{X'_d} x_3 - \frac{z_b}{X'_d} \frac{w \psi_d w_o}{w w_o \psi_{do}} \Rightarrow \\ \frac{i_d}{i_b} &= \frac{z_b}{X'_d} x_3 - \frac{z_b}{X'_d} \frac{v_q}{v_b} \frac{1}{x_2} \end{aligned} \quad (21)$$

Ekvation (11) ger

$$\begin{aligned} i_q &= - \frac{w_o \psi_q}{X_q} \\ \frac{i_q}{i_b} &= - \frac{w_o \psi_q w}{i_b X_q w} = \frac{(v_d/v_b) v_b}{x_2 X_q i_b} = \frac{z_b}{X_q} \frac{v_d}{v_b} \frac{1}{x_2} \Rightarrow \\ \frac{i_q}{i_b} &= \frac{z_b}{X_q} \frac{v_d}{v_b} \frac{1}{x_2} \end{aligned} \quad (22)$$

4.1.4. Sammanställning av ekvationerna på tillståndsform

$$\frac{dx_1}{dt} = w_0(x_2 - 1) \quad (14)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = 0.5 \left(\left(x_5 - \frac{P_e}{P_b} \right) / x_2 - D_1(x_2 - 1) \right) / H \quad (15)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \left(x_4 - \frac{i_f}{i_{fo}} \right) / T_{do}' \quad (16)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = \left(u_{1ref} - x_4 + K_1(y_{1ref} - y_1) \right) / T_r \quad (17)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = \left(u_{2ref} - x_5 + K_2(y_{2ref} - y_2) \right) / T_g \quad (18)$$

$$y_1 = \sqrt{(v_d/v_b)^2 + (v_q/v_b)^2}$$

$$y_2 = x_2$$

$$\frac{P_e}{P_b} = \frac{v_q}{v_b} \frac{i_q}{i_b} + \frac{v_d}{v_b} \frac{i_d}{i_b} \quad (19)$$

$$\frac{i_f}{i_{fo}} = \frac{X_d}{X_d'} x_3 - \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \frac{v_q}{v_b} \frac{1}{x_2} \quad (20)$$

$$\frac{i_d}{i_b} = \frac{z_b}{X_d'} x_3 - \frac{z_b}{X_d'} \frac{v_q}{v_b} \frac{1}{x_2} \quad (21)$$

$$\frac{i_q}{i_b} = \frac{z_b}{X_q} \frac{v_d}{v_b} \frac{1}{x_2} \quad (22)$$

4.2. Beräkningsgång för simulator

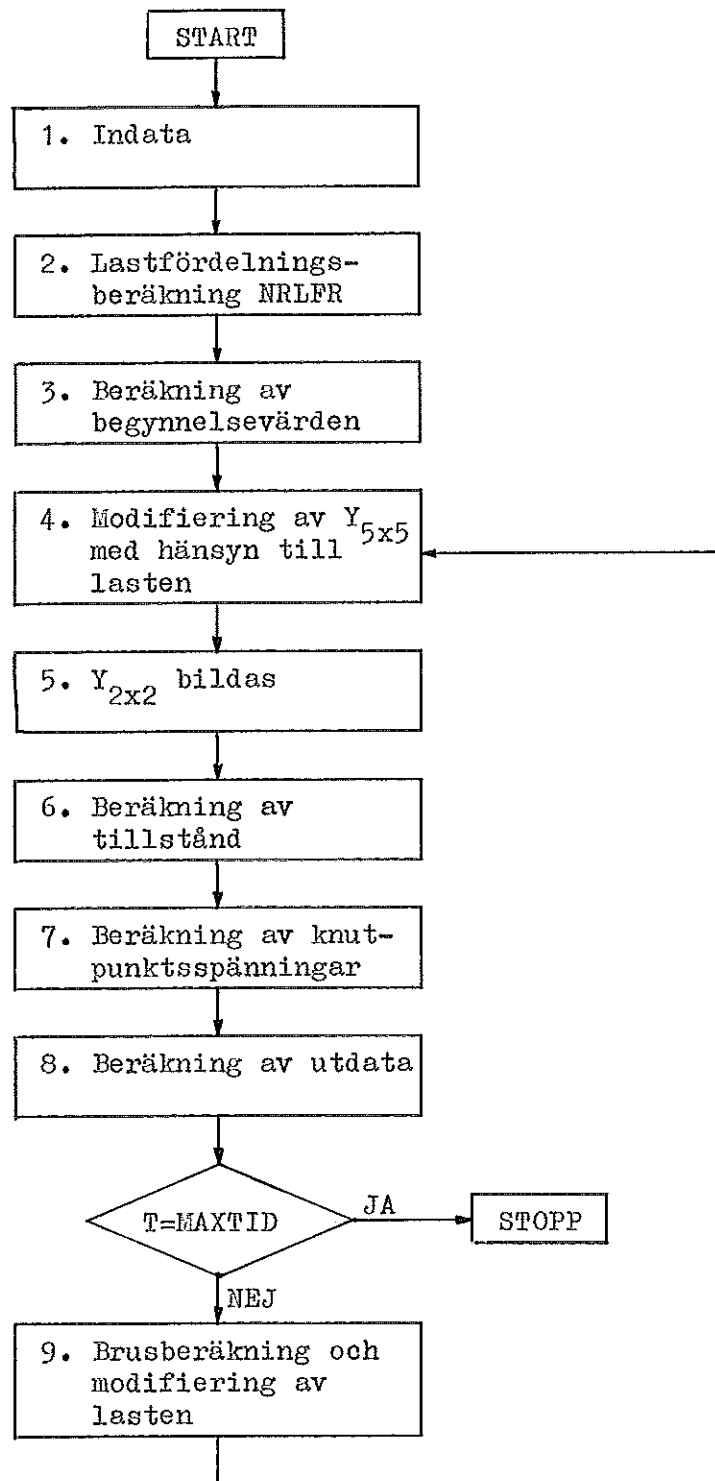
Simulatorn består av ett huvudprogram SIMNET och subrutinerna PUNC, NRLFR, MAPRI, OMAPRI samt några rutiner ur institutionens för regleringsteknik programbibliotek. De förstnämnda programmen finns listade i appendix. Nedan beskrives flödesschemat för SIMNET, se figur 4.3, med alla beräkningar utförda i per unit.

1) Indata:

I detta block inläses ledningarnas impedanser, shuntadmittanser och förbindelsepunkter. Spänningen vid en knutpunkt och de komplexa injicerade effekterna vid övriga knutpunkter anges. Med injicerad effekt menas skillnaden mellan genererad och förbrukad effekt vid knutpunkten. Begynnelsevärdet på övriga spänningar sättes lika med ett. Lasten anges vid alla knutpunkter. Brusets varians specificeras. Aktuella generatordata återges i tabell 4.1 och ledningsdata i tabell 4.2. Injicerade effekter, belastningar och antagna knutpunktsspänningar finns i tabell 4.3.

Beteckning	Gen 1	Gen 2
X_d	0.80	2.30
X'_d	0.26	0.24
X_q	0.49	1.80
D_1	1.5	1.5
K_1	30.0	30.0
K_2	50.0	50.0
H	4.40	3.70
T'_{do}	3.00	2.00
T_r	0.50	0.50
T_g	10.0	10.0

Tabell 4.1 - Generatordata.



Figur 4.3 - SIMNET.

Ledning nr	Förbindelsepunkter	Impedans	Shuntadmittansen vid en ändpunkt
1	1 - 2	$0.02 + j0.06$	$0.0 + j0.030$
2	1 - 3	$0.08 + j0.24$	$0.0 + j0.025$
3	2 - 3	$0.06 + j0.18$	$0.0 + j0.020$
4	2 - 4	$0.06 + j0.18$	$0.0 + j0.020$
5	2 - 5	$0.04 + j0.12$	$0.0 + j0.015$
6	3 - 4	$0.01 + j0.03$	$0.0 + j0.010$
7	4 - 5	$0.08 + j0.24$	$0.0 + j0.025$

Tabell 4.2 - Ledningsdata.

Knutpunkt nr	Begynnelse-spänningar	Injicerade effekter	Last
1	$1.06 + j0.0$	$0.0 + j0.0$	$0.00 + j0.00$
2	$1.00 + j0.0$	$0.20 + j0.20$	$0.20 + j0.10$
3	$1.00 + j0.0$	$-0.45 - j0.15$	$0.45 + j0.15$
4	$1.00 + j0.0$	$-0.40 - j0.05$	$0.40 + j0.05$
5	$1.00 + j0.0$	$-0.60 - j0.10$	$0.60 + j0.10$

Tabell 4.3 - Begynnelsevärden.

2) Lastfördelningsberäkning:

Lastfördelningsberäkningen utföres i enlighet med [5], Newton-Raphsons metod med användning av knutpunktsadmittansmatrisen och rektangulära koordinater. Se appendix D. Som resultat fås de komplexa knutpunktsspänningarna och injicerade effekten vid knutpunkt ett. Knutpunktsadmittansmatrisen erhålles som biprodukt.

3) Beräkning av begynnelsevärden:

Med utgångspunkt från komplex knutpunktsspänning $v_d + jv_q$ och

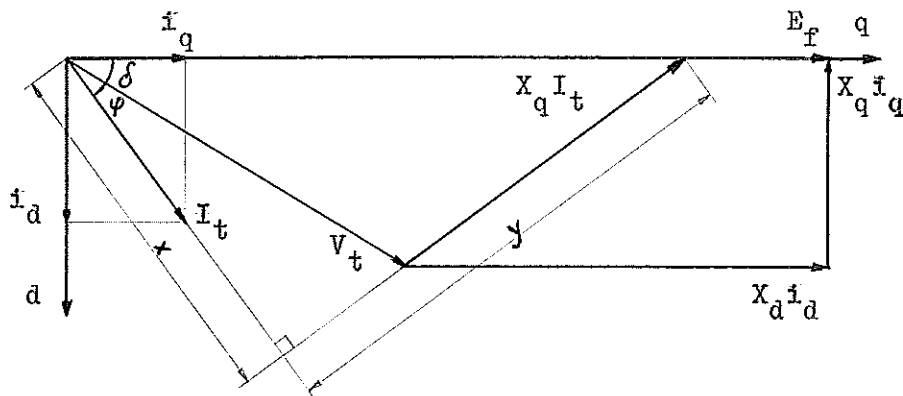
generatoreffekt $P+jQ$ skall vi beräkna begynnelsestillstånd och referensvärden. Begynnelsevärde på w är w_0 och på P_m är P , där P är aktiv generatoreffekt. Återstående variabler är θ , Ψ_f och v_f .

Skenbar effekt: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Fasvinkel: $\varphi = \arctan(Q/P)$

Spänningens absolutbelopp: V_t

Strömmens absolutbelopp: $I_t = S/V_t$



Figur 4.4

x och y i figur 4.4 beräknas.

$$\cos\varphi = P/S$$

$$\sin\varphi = Q/S$$

$$x = V_t \cos\varphi$$

$$y = V_t \sin\varphi + X_q I_t$$

Dessa samband medför

$$x = V_t (P/S)$$

$$y = V_t (Q/S) + X_q I_t$$

Vinkeln $(\varphi + \delta)$ bestäms ur

$$\tan(\varphi + \delta) = y/x \quad \text{och}$$

$$\varphi = \arctan(Q/P) \quad \text{vilket ger } \delta.$$

Om Ψ är V_t :s vinkeläge i förhållande till en gemensam referens så blir

$$\theta = \Psi + \delta - \frac{\pi}{2}$$

d-axelns vinkel gentemot samma referens och alltså även begynnelsestillstånd för x_1 .

Ur figur 4.4 fås även

$$v_d = V_t \sin \delta$$

$$v_q = V_t \cos \delta$$

$$i_d = I_t \sin(\varphi + \delta)$$

Eftersom $x_{20} = w/w_0$ är bestämt ger ekvation (21) x_{30}

$$i_d = \frac{1}{X_d'} x_{30} - \frac{1}{X_d'} v_q \frac{1}{x_{20}} \quad \Leftrightarrow$$

$$x_{30} = X_d' i_d + v_q / x_{20}$$

Insättes x_{20} och x_{30} i (20) fås

$$i_f = \frac{X_d}{X_d'} x_{30} - \frac{X_d - X_d'}{X_d'} v_q \frac{1}{x_{20}} \quad \text{vilket ger}$$

$$x_{40} = i_f \quad \text{då} \quad \frac{dx_3}{dt} = 0.$$

$x_{50} = P$ har vi redan bestämt.

Nu återstår referensvärdena.

$y_{1\text{ref}}$ - referensvärde för terminalspänning sättes lika med V_t och

$y_{2\text{ref}}$ - referensvärde för vinkelhastighet sättes lika med 1.

På grund av att differentialekvationerna skall ha en stationär punkt vid begynnelsestillstånd sättes

$$u_{1\text{ref}} = x_{40} = i_f \quad \text{och}$$

$$u_{2\text{ref}} = x_{50} = P$$

4) Modifiering av $Y_{5 \times 5}$ med hänsyn till lasten:

För att förenkla beräkningarna har vi valt att omräkna belastningarna till admittanser. Dessa adderas till knutpunktsadmittansmatrisens (i vårt fall en 5×5 matris) diagonal. Belastningsadmittanserna ges av

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} = \frac{I}{V} = \frac{IV^x}{|V|^2} = \frac{S^x}{|V|^2}$$

där samtliga variabler är komplexa och x betyder komplexkonjugering.

5) $Y_{2 \times 2}$ bildas:

Eftersom lasterna omräknats till admittanser och dessa adderats till Y -matrisens diagonal fås följande samband mellan strömmar och spänningar

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix}$$

eller i blockform

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

I ekvationsform fås

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2$$

$$0 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2$$

vilka medför

$$I_1 = (Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21})V_1$$

$$V_2 = -Y_{22}^{-1}Y_{21}V_1$$

dvs sambandet mellan generatorströmmar och generatorspänningar är

$$I_1 = Y_{2x2}V_1$$

där

$$Y_{2x2} = Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21}$$

Genom att lösa ekvationssystemet

$$Y_{22}A = Y_{21}$$

med hjälp av CDECOM och CSOLVB (ur reglertekniks programbibliotek) får vi

$$A = Y_{22}^{-1}Y_{21}$$

och det återstår att beräkna

$$Y_{2x2} = Y_{11} - Y_{12}A$$

I nästa block undviker vi komplexa beräkningar genom att enligt [6] omvandla n st ekvationer

$$I_1 = Y_{2x2}V_1$$

till 2n st ekvationer

$$\begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{N1} & -B_{N1} \\ B_{N1} & G_{N1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix}$$

där

$$I_D = (i_{D1}, i_{D2})^T$$

$$I_Q = (i_{Q1}, i_{Q2})^T$$

$$V_D = (v_{D1}, v_{D2})^T$$

$$V_Q = (v_{Q1}, v_{Q2})^T$$

G_{N1} består av realdelarna i Y_{2x2}

B_{N1} består av imaginärdelarna i Y_{2x2}

Den nya matrisen benämnes Y'_{2x2} .

6) Beräkning av tillstånd:

Här använder vi biblioteksrutinen RK1ST för att lösa differentialekvationerna (14) - (18). Eftersom SIMNET (figur 4.3) beräknar värden med i vårt fall en sekunds intervall och tidskonstanten för spänningsregulatorerna är 0.5 sekunder så måste vi lösa differentialekvationerna i etapper. Vi bildar en inre slinga som här genomlöps tio gånger varje gång block sex passerar. RK1ST fordrar en subrutin FUNC, som beräknar derivatorna $F(x,t)=dx/dt$ i punkten (x,t) . FUNC anropas fyra gånger vid varje anrop av RK1ST. Därför måste även transformationen av $Y'_{2 \times 2}$ till lokala koordinater (se nedan) finnas med i FUNC. Vridningsvinklarna bestämmas nämligen av x_1 -tillstånden.

Beskrivning av FUNC (se figur 4.5).

F1) Vridning av $Y'_{2 \times 2}$ till generatorreferenser:

$Y'_{2 \times 2}$ transformeras så att beräkningarna kan utföras i lokala koordinater för generatorerna [6].

$$Y'_{g2 \times 2} = \begin{bmatrix} G_{N2} & -B_{N2} \\ B_{N2} & G_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{N1} & -B_{N1} \\ B_{N1} & G_{N1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & -S \\ S & C \end{bmatrix}$$

F2) Modifiering av $Y'_{g2 \times 2}$ med hänsyn till generatoradmittanser:
Ekvation (21) och (22) ger

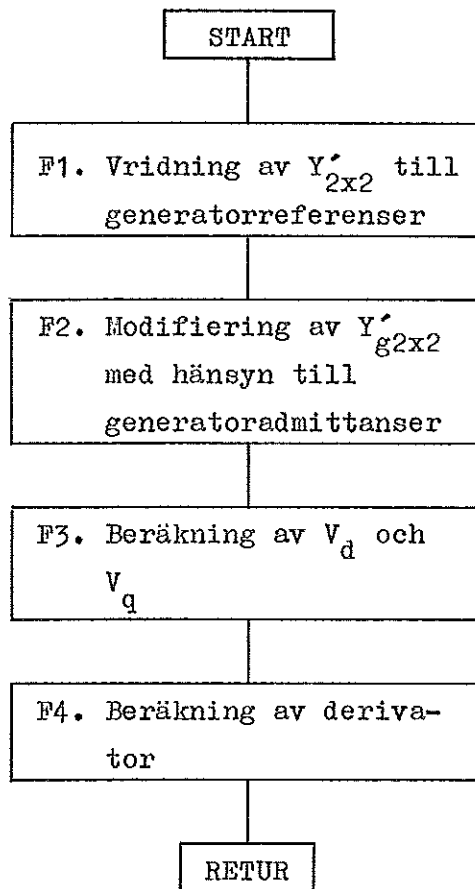
$$i_d = x_3/X'_d - v_q/X'_d x_2$$

$$i_q = v_d/X'_q x_2$$

eller i matrisform

$$I_d = Y_{d1} E - Y_{d2} V_q$$

$$I_q = Y_{q2} V_d$$



Figur 4.5 - FUNC

där

$$Y_{d1} = \text{diag}(1/X'_{d1}, 1/X'_{d2})$$

$$Y_{d2} = \text{diag}(1/X'_{d1}x_{21}, 1/X'_{d2}x_{22})$$

$$Y_{q2} = \text{diag}(1/X'_{q1}x_{21}, 1/X'_{q2}x_{22})$$

$$E = (x_{31}, x_{32})^T$$

Sambandet mellan generatorspänningar och strömmar blir nu i lokala referenser

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{N2} & -B_{N2} \\ B_{N2} & G_{N2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

eller med I_d och I_q insatta

$$\begin{bmatrix} Y_{d1} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{N2} & Y_{d2} - B_{N2} \\ B_{N2} - Y_{q2} & G_{N2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

F3) Beräkning av V_d och V_q :

Ovanstående ekvationssystem löses med hjälp av DECOM och SOLVB.

F4) Beräkning av derivator:

Ekvationerna (14) - (22) beräknas i punkten (x, t) .

7) Beräkning av knutpunktsspänningar:

Från subrutinen FUNC fås knutpunktsspänningarna för knutpunkt ett och två i lokala koordinatsystem. Efter en koordinat-transformation till det ursprungliga systemet beräknas övriga spänningar enligt beskrivning i block 5).

8) Beräkning av utdata:

Vi söker knutpunktsspänningarnas absolutbelopp och fasvinklar, knutpunktseffekter samt linjeeffekter. Spänningarnas absolutbelopp och fasvinklar fås enkelt eftersom de komplexa spänningarna beräknats i föregående block. Komplexa linjeeffekten fås ur formlerna

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^*$$

$$I_{ij} = (V_i - V_j) y_{ij} + y_{nij}$$

där

y_{ij} = ledningsadmittansen exklusive shuntadmittanser

y_{nij} = shuntadmittansen för ledning ij vid knutpunkt i

Ledningsadmittansen fås ur admittansmatrisen Y , ty $y_{ij} = -Y_{ij}$ om $i \neq j$. Knutpunktseffekterna är lika med summan av linje-effekterna vid respektive knutpunkt.

9) Brusberäkning och modifiering av lasten:

Vi ansätter att lasterna hålls konstanta utom i knutpunkt fem, där lasten varieras som en rampfunktion plus brus

$$P(t) = at + \eta_1(t)$$

$$Q(t) = bt + \eta_2(t)$$

a och b sättes lika med 0.5 % av maxlast per minut enligt figur 7 i referens [7]. Autokorrelationsfunktionen i figur 14 i samma referens indikerar ett andra ordningens system med tidskonstanter $T_1=1$ min och $T_2=8$ min. Bruset får vi genom att sända vitt brus genom ett linjärt filter med viktsfunktionen

$$h(t) = 0.4e^{-\frac{t}{50}} + 0.6e^{-\frac{t}{500}}$$

Vitt brus genereras av subrutinen MNODI i programbiblioteket. Laplace-transformering av $h(t)$ ger överföringsfunktionen

$$G(s) = \frac{0.4}{s + 1/50} + \frac{0.6}{s + 1/500}$$

och i samplad form blir tillståndsekvationerna för brusfiltreringen

$$x_1(t+H) = e^{-\frac{H}{50}}x_1(t) + 50(1 - e^{-\frac{H}{50}})u(t)$$

$$x_2(t+H) = e^{-\frac{H}{500}}x_2(t) + 500(1 - e^{-\frac{H}{500}})u(t)$$

$$y(t) = 0.4x_1(t) + 0.6x_2(t)$$

Nu har vi beräknat $\eta_1(t) = y(t)$. $\eta_2(t)$ beräknas med samma ekvationer men med ny insignal från brusgeneratoren.

5. STATISK TILLSTÅNDESTIMERING

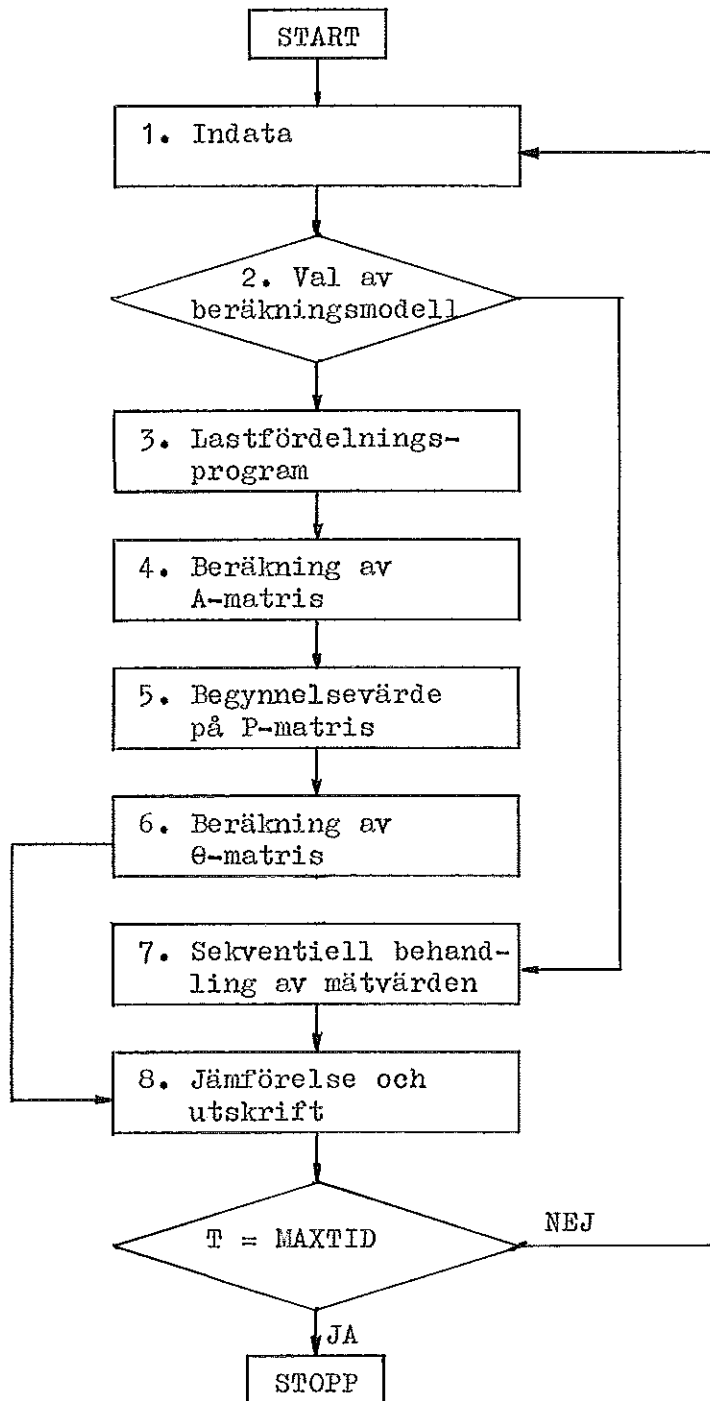
I avsnitt 2 och 3 har vi härlett ekvationerna för fullständig Kalmanfiltrering och uppskattat operationstider för olika typer av Kalmanfiltrering. Dessa beräkningar visade att dynamisk tillståndsestimering med fullständig Kalmanfiltrering är alltför långsam för stora kraftsystem. Reducerad Kalmanfiltrering ger däremot rimliga operationstider, i synnerhet om algoritmer för glesa matriser används. Denna metod innebär att vi antar att systemet är kvasi-stationärt. Nedan behandlar vi både fallet med full och fallet med diagonal P-matris men bryr oss inte om att Θ -matrisen till stor del består av nollor. Programmen för dessa fall, NETEST respektive NETDIG, finns listade i appendix C. De skiljer sig endast åt i rutinen för "sekvensbearbetning". Det är naturligtvis onödigt att i fallet med diagonal P-matris beräkna begynnelsevärden för hela P-matrisen, som här gjorts för att reducera programmeringsarbetet.

5.1 Beräkningsgång för estimator

Vid tillståndsestimeringen betecknar tillstånden de komplexa knutpunktsspänningarna. Knutpunkt fem betraktar vi som referens och sätter spänningens imaginärdel lika med noll. Vi beskriver nu flödesschemat i figur 5.1, som i stort följer referens [4].

1) Indata:

Här inläses ledningarnas impedanser, shuntadmittanser och förbindelsepunkter samt kovariansmatriser för mätvärden och tillstånd. Dessutom specificeras vilka mätvärden som skall behandlas. Mätvärdena utan brus har beräknats och lagrats av simulatören i avsnitt 4. Därför produceras här brus av önskvärd varians med rutinen MNODI i programbiblioteket och adderas till mätvärdena.



Figur 5.1 - NETEST.

2) Val av beräkningsmodell:

Vid start av estimatorn genomlöps slingan med lastfördelningsprogrammet. Därefter kontrolleras hur mycket spänningarnas absolutbelopp och fasvinklar avviker ifrån den punkt kring vilken ekvationerna linjäriserats. Vid stor avvikelse genomlöps på nytt lastfördelningsprogrammet, annars behandlas mätvärdena sekventiellt i block 7.

3) Lastfördelningsprogram:

Lastfördelningsprogrammet NRLFR i appendix D användes för beräkning av begynnelsestillstånd och dessa i sin tur vid linjärisering av ekvationerna. Det beräknar även knutpunktsadmittansmatrisen Y .

4) Beräkning av A-matris:

Ur lastfördelningsprogrammet har vi fått ett begynnelsestillstånd x_0 som en lösning till ett ekvationssystem

$$f(x_0, z_0) = 0$$

där z_0 betecknar ingångsdata.

Vi bildar nu derivatorna

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0} = A$$

där A definierar sambandet

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \Delta V_D \\ \Delta V_Q \end{bmatrix}$$

och $P_p + jQ_p$ är injicerad knutpunktseffekt samt $V_D + jV_Q$ är knutpunktsspänning. Knutpunktseffekten $S_p = P_p + jQ_p$ ges av

$$S_p = U_p I_p^x$$

och knutpunktsströmmen av

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} U_q$$

där Y är knutpunktsadmittansmatrisen och n antalet knutpunkter.

Om P_p och Q_p deriveras fås med

$$U_p = e_p + jf_p ; \quad I_p = c_p + jd_p ; \quad Y_{pq} = g_{pq} + jb_{pq} ;$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_p} = e_p g_{pp} + f_p b_{pp} + c_p$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_q} = e_p g_{pq} + f_p b_{pq}$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_p} = -e_p b_{pp} + f_p g_{pp} + d_p$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_q} = -e_p b_{pq} + f_p g_{pq}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_p} = -e_p b_{pp} + f_p g_{pp} - d_p$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_q} = -e_p b_{pq} + f_p g_{pq}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_p} = -e_p g_{pp} - f_p b_{pp} + c_p$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_q} = -e_p g_{pq} - f_p b_{pq}$$

5) Begynnelsevärde på P-matris:

Sätt

$$\Delta z_0 = (\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n, \Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_n)^T$$

$$\Delta x_0 = (\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_n, \Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_n)^T$$

Då får vi enligt block 4

$$\Delta z_0 = A \Delta x_0 \quad \text{dvs}$$

$$\Delta x_0 = A^{-1} \Delta z_0$$

Kovariansmatrisen blir nu

$$P_0 = E\{\Delta x_0 \Delta x_0^T\} = E\{A^{-1} \Delta z_0 \Delta z_0^T (A^{-1})^T\} = A^{-1} R_z (A^{-1})^T$$

Sätt

$$R_z (A^{-1})^T = C. \quad \text{Detta ger}$$

$$C^T = A^{-1} R_z$$

Lös

$$A C^T = R_z \quad \text{och därefter}$$

$$A P_0 = C$$

Beräkningarna utföres med DECOM och SOLVB i programbiblioteket.

6) Beräkning av Θ -matris (i programmet betecknad F):

Vi skall nu konstruera en matris som ger sambandet mellan samtliga mätvärden och samtliga tillstånd

$$\Delta z = \Theta \Delta x$$

där z betecknar mätvärden.

Övre delen av denna matris ger sambandet mellan knutpunkts-effekter och tillstånd och är alltså redan beräknad (A-matrisen).

Mellersta blocket svarar mot linjeeffekterna

$$S_{pq} = P_{pq} + jQ_{pq} = U_p I_{pq}^x$$

$$I_{pq} = (U_q - U_p) Y_{pq} + U_p y_{n_{pq}}$$

där

$$Y_{pq} = -y_{pq} \quad \text{för } p \neq q$$

y_{pq} är ledningen pq:s admittans

$y_{n_{pq}}$ är ledningen pq:s shuntadmittans vid knutpunkt p

Om P_{pq} och Q_{pq} deriveras fås med

$$U_p = e_p + jf_p ; \quad I_{pq} = c_{pq} + jd_{pq} ;$$

$$Y_{pq} = g_{pq} + jb_{pq} ; \quad y_{n_{pq}} = g_{n_{pq}} + jbn_{pq} ;$$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial e_p} = -e_p (g_{pq} - g_{n_{pq}}) - f_p (b_{pq} - bn_{pq}) + c_{pq}$$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial e_q} = e_p g_{pq} + f_p b_{pq}$$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial f_p} = e_p (b_{pq} - bn_{pq}) - f_p (g_{pq} - g_{n_{pq}}) + d_{pq}$$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial f_q} = -e_p b_{pq} + f_p g_{pq}$$

$$\frac{\partial Q_{pq}}{\partial e_p} = e_p (b_{pq} - bn_{pq}) - f_p (g_{pq} - g_{n_{pq}}) - d_{pq}$$

$$\frac{\partial Q_{pq}}{\partial e_q} = -e_p b_{pq} + f_p g_{pq}$$

$$\frac{\partial Q_{pq}}{\partial f_p} = e_p (g_{pq} - g_{n_{pq}}) + f_p (b_{pq} - bn_{pq}) + c_{pq}$$

$$\frac{\partial Q_{pq}}{\partial f_q} = -e_p g_{pq} - f_p b_{pq}$$

Nedre blocket av θ definierar sambandet mellan spänningarnas absolutvärden och de komplexa spänningarna. Om fasvinkeln är ψ_p får vi

$$\frac{\partial |U_p|}{\partial e_p} = \cos \psi_p$$

$$\frac{\partial |U_p|}{\partial f_p} = \sin \psi_p$$

7) Sekventiell behandling av mätvärden:

I detta block använder vi i princip Kalmanekvationerna med ϕ utbytt mot enhetsmatrisen. (Jämför avsnitt 2.) Om vi dessutom vill behandla ett mätvärde åt gången blir ekvationerna

$$\Delta x_k = \Delta x_{k-1} + K_k (\Delta z_k - h_k \Delta x_{k-1})$$

$$K_k = P_{k-1} h_k^T (\sigma_k^2 + h_k P_{k-1} h_k^T)^{-1}$$

$$P_k = (I - K_k h_k) P_{k-1}$$

där

Δx_k är en vektor som anger avvikelserna från begynnelsestillståndet x_0 , efter att k mätningar behandlats

P_k är motsvarande kovarians

Δz_k är k :e mätvärdets avvikelse från k :e värdet av begynnelsemätvektorn z_0

h_k är k :e raden i O -matrisen

σ_k^2 är variansen för k :e mätningen

K_k är viktsvektorn för k :e mätningen

8) Jämförelse och utskrift:

Vi jämför här de estimerade spänningarna med de exakta, som lagrats vid simuleringen. Dessutom beräknas den verkliga standardavvikelsen.

5.2 Resultat av estimeringen

Estimatoren testades med både full och diagonal P -matris (NETEST resp. NETDIG). Eftersom R_1 -matrisen inte beräknats vid simuleringen undersöktes variansens beroende av denna matris, dels vid redundansen 1.0 och dels vid maximal redundans, som i detta fall var 4.8. Denna erhöles då samtliga knutpunkts- och linjeeffekter samt knutpunktsspänningar mättes. Vid redundansen 1.0 mättes endast knutpunktsspänningar och aktiva knutpunktseffekter.

1) Full P-matris och maximal redundans (diagram 5.1):

God överensstämmelse erhöles mellan estimatorfelet och standardavvikelsen vid $R_1=1.0 \cdot 10^{-6}$. Vi fick ett verkligt fel på 3 promille. Operationstiden blev däremot ganska lång. Det tog 380 ms att behandla alla 43 mätvärdena från ett samplingsintervall.

2) Full P-matris och ingen redundans (diagram 5.2):

Även i detta fall överensstämde standardavvikelse och verkligt fel ganska bra. Operationstid 85 ms.

3) Diagonal P-matris och maximal redundans (diagram 5.3):

Operationstiden var här bara 24 ms. Teoretiska beräkningar enligt avsnitt 3 ger 20 ms. De beräkningarna är alltså tillförlitliga. Att det teoretiska värdet är något lägre kan förklaras med att ytterligare någon rutin (bl.a. utskrift) ingår i estimator-programmet, men inte vid beräkningarna i avsnitt 3. Estimatorfelet överensstämde bra med standardavvikelsen när det gällde spänningarnas realdelar, men avvek något från standardavvikelsen för stora värden på R_1 , när det gällde imaginärdelarna. Avvikelsen var dock betydligt mindre än i fall 2). För R_1 mindre än $5.0 \cdot 10^{-5}$ var det verkliga felet mindre än 4 promille.

4) Diagonal P-matris och ingen redundans (diagram 5.4):

Estimatorfelet avviker här från standardavvikelsen mer än i övriga fall. Operationstiden var 6 ms, medan den teoretiskt beräknade var 5 ms. Detta visar åter tillförlitligheten hos de teoretiska värdena på operationstiden.

Förutom beräkning av standardavvikelse och verkligt fel som funktion av R_1 -matrisen vid full respektive ingen redundans, kontrollerades några mellanliggande värden på redundansen. Det visade sig att man utan större förluster i noggrannhet kan utesluta såväl aktiva som reaktiva knutpunktseffekter. För start av estimatorn fordras dock tillgång till dessa värden, men de kan beräknas som summan av linjeeffekterna vid

respektive knutpunkt. Resultatet återges i tabell 5.1. Av denna framgår att operationstiden, för behandling av samtliga mätvärden inom ett samplingsintervall, förkortades med 27 % för NETEST och 23 % för NETDIG.

Prog-ram	Redundans	R_1	σ_{V_D}	ε_{V_D}	σ_{V_Q}	ε_{V_Q}	Op.-tid ms
NETEST	4.8	$3.16 \cdot 10^{-6}$	0.00319	0.00269	0.00201	0.00122	483
	3.7	$3.16 \cdot 10^{-6}$	0.00326	0.00295	0.00219	0.00195	352
NETDIG	4.8	$3.16 \cdot 10^{-5}$	0.00574	0.00293	0.00577	0.00150	22
	3.7	$3.16 \cdot 10^{-5}$	0.00586	0.00288	0.00599	0.00186	17

Tabell 5.1 - Standardavvikelse och verkligt fel vid redundans lika med 4.8 och 3.7.

Ytterligare minskning av redundansen var inte framgångsrik annat än i fallet NETEST (full P-matris). Om vi endast mäter knutpunktsspänningar samt aktiva och reaktiva linjeeffekter i en riktning har vi en redundans lika med 2.1. Operationstiden blir 67 % kortare än vid full redundans. I tabell 5.2 visas resultaten vid två olika värden på R_1 .

Prog-ram	Redundans	R_1	σ_{V_D}	ε_{V_D}	σ_{V_Q}	ε_{V_Q}	Op.-tid ms
NETEST	2.1	$1.00 \cdot 10^{-5}$	0.00481	0.00291	0.00371	0.00479	160
	2.1	$1.00 \cdot 10^{-4}$	0.01154	0.00444	0.01030	0.00509	160

Tabell 5.2 - Standardavvikelse och verkligt fel vid redundansen 2.1.

Resultatet av tillståndsestimeringen pekar mot att estimeringen bör utföras med diagonal P-matris. Denna metod ger både kort operationstid och bra noggrannhet. Det bör dock betonas att tillståndsestimatorn kontrollerats på ett litet kraftnät med fem knutpunkter. I verkligheten skall kanske nät med mer

än etthundra knutpunkter behandlas och det är svårt att förutsäga om estimatorn fungerar i ett sådant fall.

I efterhand har de verkliga värdena på R_1 -matrisens diagonal beräknats. Dessa beräkningar har gjorts med något färre mätvärden än vad estimatorn testats på. Resultatet framgår av tabell 5.3.

R_1 -matrisens diagonal

$$0.37 \cdot 10^{-10}$$

$$0.65 \cdot 10^{-10}$$

$$0.74 \cdot 10^{-10}$$

$$0.85 \cdot 10^{-10}$$

$$0.41 \cdot 10^{-9}$$

$$0.34 \cdot 10^{-8}$$

$$0.21 \cdot 10^{-8}$$

$$0.16 \cdot 10^{-8}$$

$$0.13 \cdot 10^{-8}$$

Tabell 5.3

De verkliga värdena på R_1 -matrisens diagonal ger, om man extrapolerar i diagrammen 5.1-5.4, ett litet verkligt fel. Däremot överensstämmer standardavvikelsen och det verkliga felet dåligt. Detta kan möjligen bero på att vi räknar med diagonal R_1 -matris. Övriga värden i R_1 -matrisen har inte beräknats och därför kan vi inte kontrollera om det är rimligt att approximera dessa med noll.

Diagram 5.1 - Standardavvikelse och verkligt fel som funktion av R_1 -matrisen.

Full P-matris och redundansen 4.8.

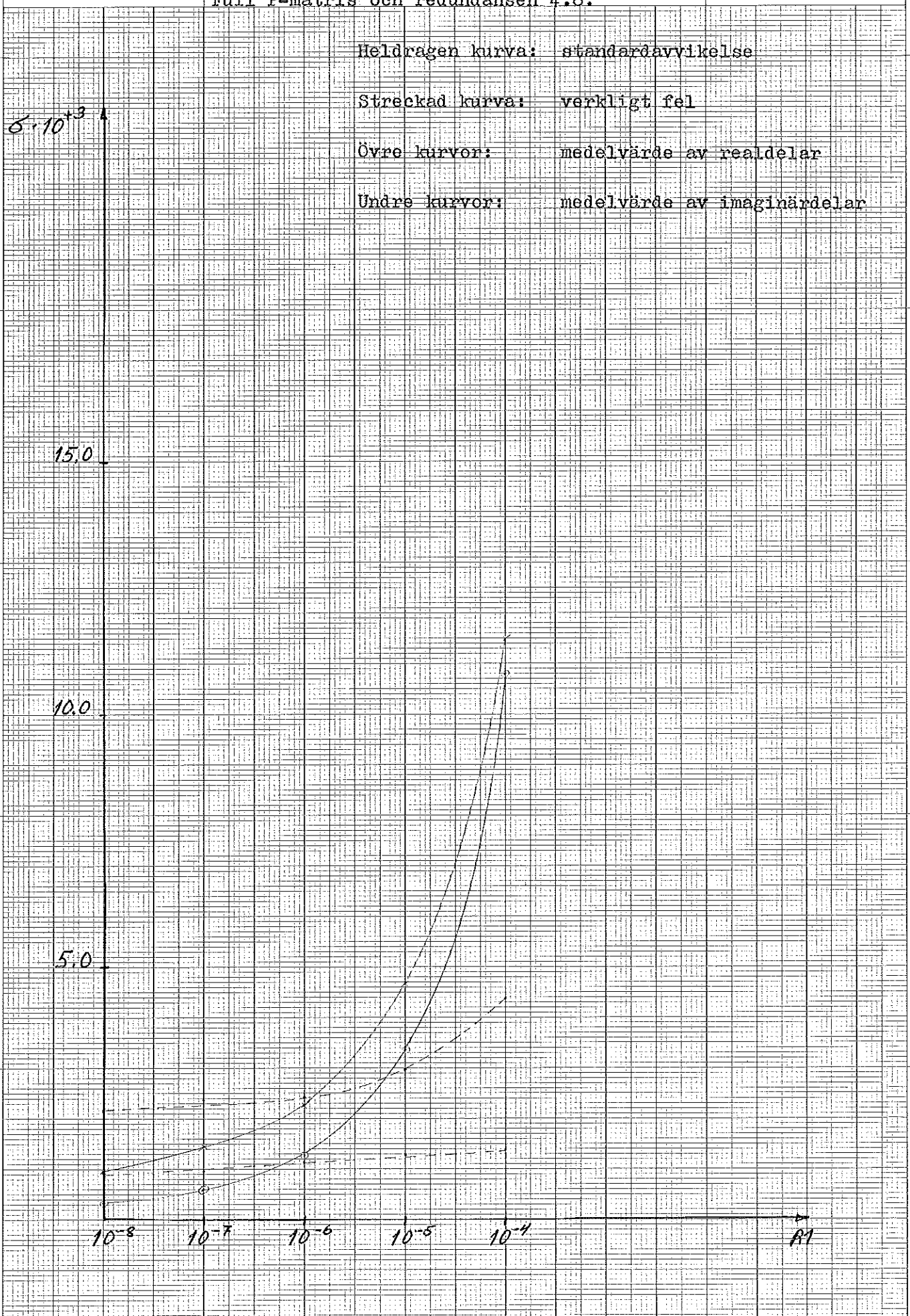


Diagram 5.2 - Standardavvikelse och verkligt fel som funktion av R_1 -matrisen.
Full P-matris. Redundans 1.0.

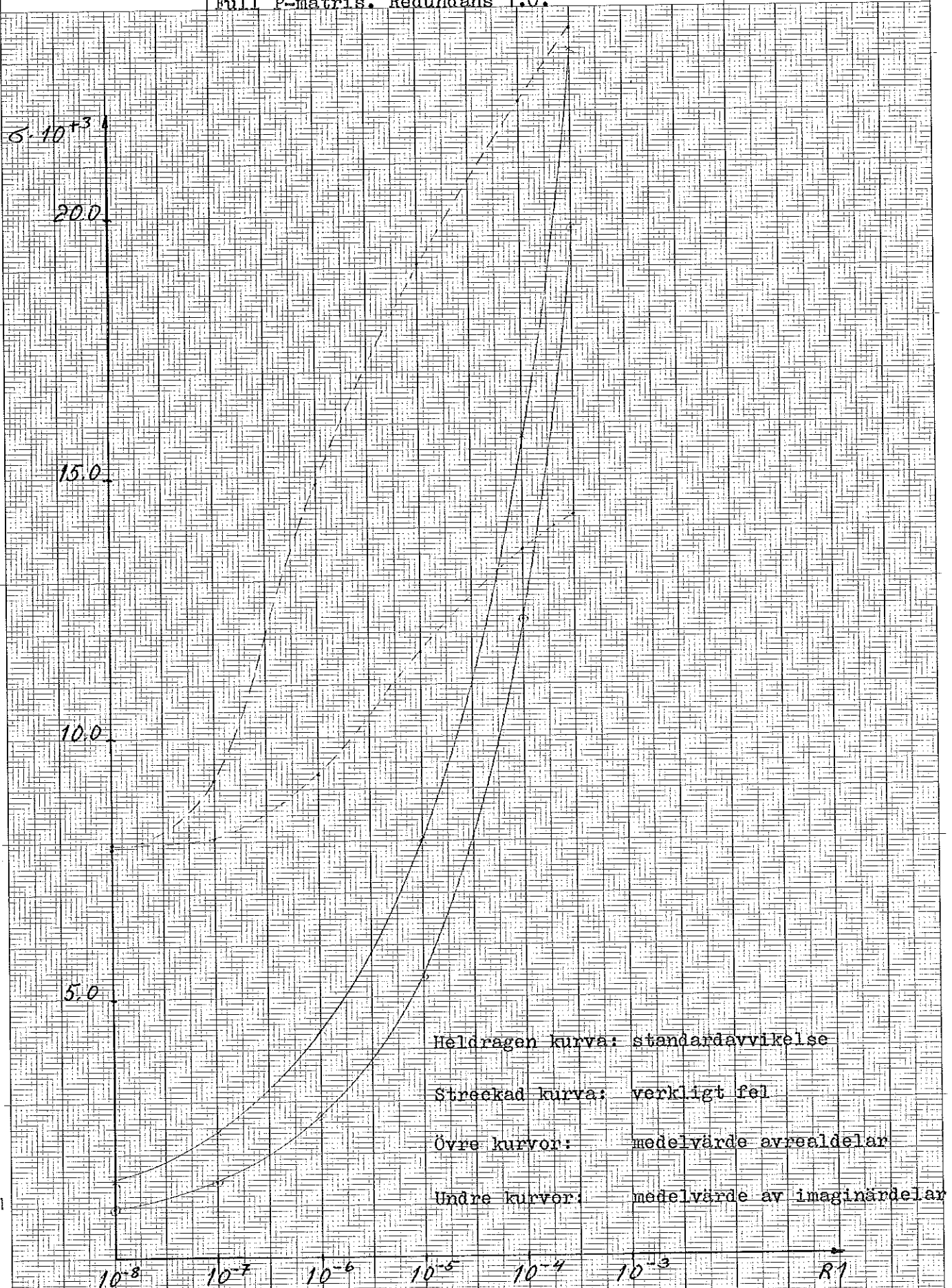


Diagram 5.3 - Standardavvikelse och verkligt fel som funktion av R_1 -matrisen.
Diagonal P-matris. Redundans 4.8.

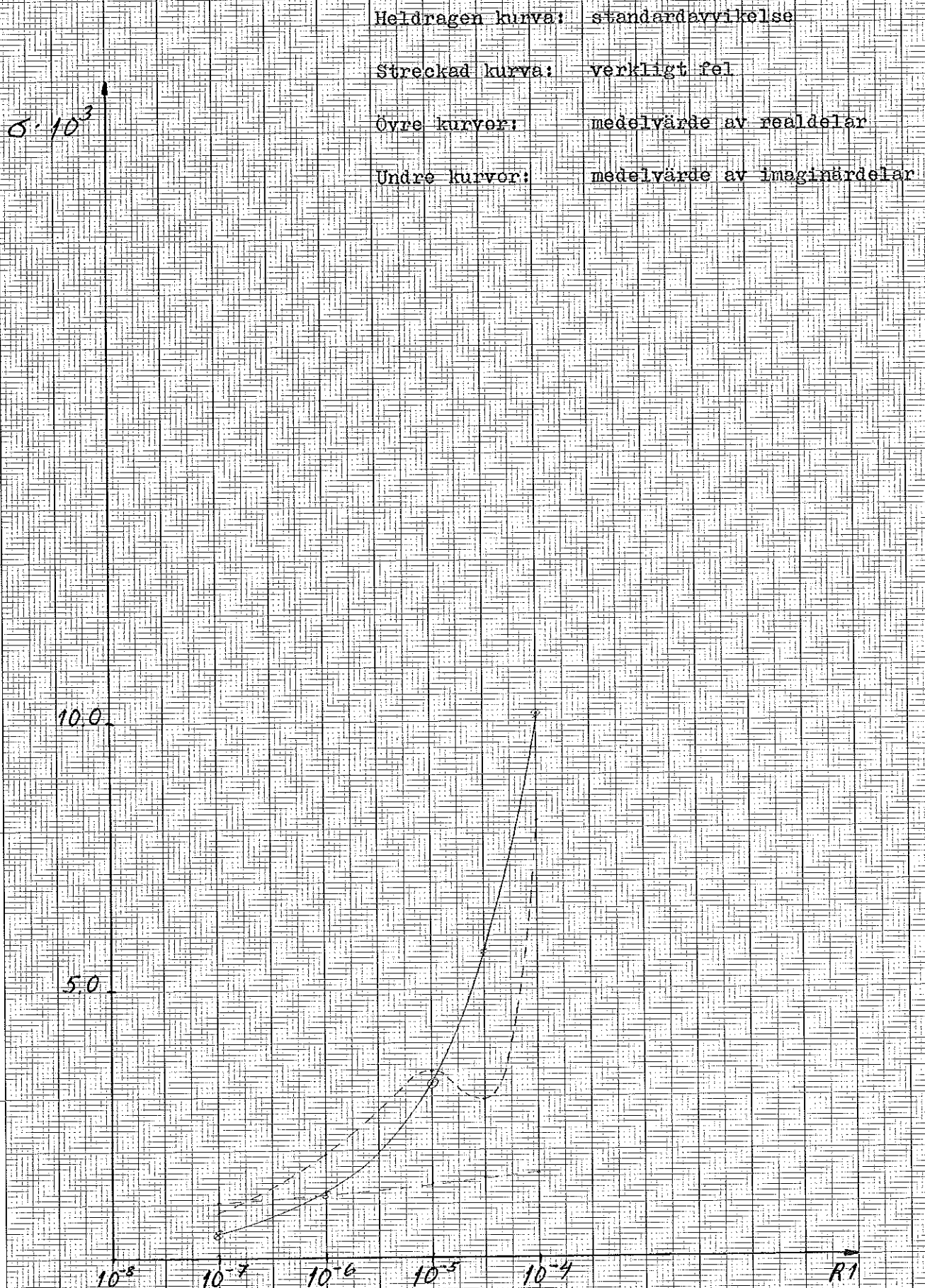
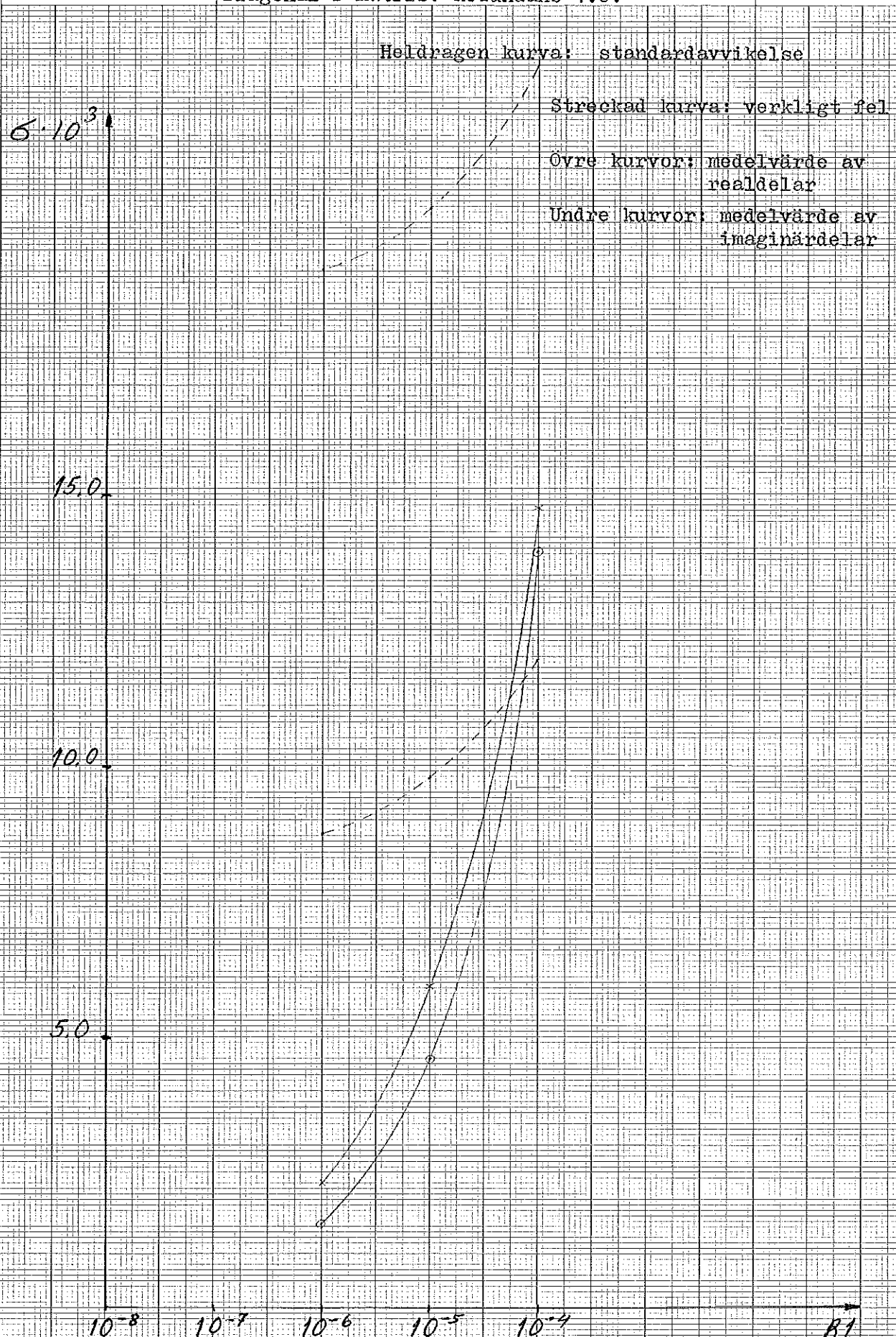


Diagram 5.4 - Standardavvikelse och verkligt fel som funktion av R_1 -matrisen.

Diagonal P-matris. Redundans 1.0.



6. SLUTSATSER

Vid tillståndsestimering i elkraftsystem är det, som vi tidigare påpekat, av stor betydelse att operationstiderna är korta. Dessutom vill man ha god noggrannhet. Diagrammen 3.1 och 3.2 visar att kravet på korta operationstider begränsar valet av estimator med tanke på att antalet mätvärden och tillstånd i regel är stort i ett elkraftsystem. Vi måste alltså ge avkall på noggrannheten och får kanske begränsa antalet kontrollrutiner, för att hinna behandla den viktigaste informationen inom rimliga tidsgränser. Om operationstiden blir för lång mister ju värdena sin aktualitet. Det visar sig vid tillståndsestimeringen att de teoretiska uppskattningarna på operationstiderna i avsnitt 3 stämmer bra överens med de verkliga. Noggrannheten kan man däremot inte kontrollera lika enkelt. En simulering på datamaskin med rimliga data bör ge svar på hur noggrannt estimatorn arbetar. Problemet är nu att få fram rimliga data. Det finns två metoder för detta, dels kan man samla in mätvärden från ett verkligt system och dels kan man simulera mätvärdena med en god modell. Den sista metoden är som regel enklast att genomföra och man har möjlighet att prova estimatorn på olika nätmodeller.

Vår modell inför, som vi nämnt i avsnitt 4, tillståndsbruset i estimatorn på ett naturligt sätt via mätvärdena. Det visar sig att noggrannheten vid tillståndsestimeringen beror kraftigt på hur kovariansmatrisen för tillståndbruset, R_1 , uppskattas. Eftersom vi inte hade tillgång till de verkliga värdena på R_1 då estimatorn testades, antogs denna vara diagonal och diagonalelementen sattes lika stora. För olika värden på R_1 avvek standardavvikelsen och det verkliga felet olika mycket från varandra. För stora värden på R_1 var standardavvikelsen större än det verkliga felet och för små värden på R_1 var det tvärtom. Tendensen var dock att ju mindre värde på R_1 desto mindre verkligt fel och standardavvikelse. Det är alltså inte helt självklart hur R_1 skall väljas. I fallet med full P-matris och redundansen 4.8 var det möjligt att ur diagram 5.1 direkt

bestämna en diagonal R_1 -matris som ger mycket god överensstämmelse mellan standardavvikelse och verkligt fel. Detta värde på R_1 gav dock inte det minsta felet. Vid beräkning av R_1 efteråt visade det sig också att de verkliga värdena på diagonalelementen var betydligt mindre än vad vi skattat. Vi kontrollerade dock endast diagonalvärdena och det är möjligt att övriga värden var av samma storleksordning eller större och således inte borde ha approximerats med noll. Detta kan kanske ge svar på frågan varför inte standardavvikelsen och det verkliga felet överensstämde bättre och bättre ju närmare det verkliga värdet på R_1 -matrisen vi kom. Vi bör dock komma ihåg att avvikelserna vi här nämnt är av storleksordningen några promille och denna noggrannhet bör vara fullt tillräcklig i ett elkraftsystem.

7. REFERENSER

- [1] Åström, K.J.: "Introduction to Stochastic Control Theory", Academic Press, 1970, pp.142-148.

- [2] Källström, C. and Åström, K.J.: "Real Time Computing III Implementing Linear Filtering and Control Algorithms", Report 7122(B), Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1971.

- [3] Larsson, R.L., Tinney, W.F. and Peschon, J.: "State Estimation in Power Systems, Part I: Theory and Feasibility", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89, No.3, March 1970, pp.345-352.

- [4] Larsson, R.L., Tinney, W.F., Hajdu, L.P. and Piercy, D.S.: "State Estimation in Power Systems, Part II: Implementation and Applications", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89, No.3, March 1970, pp. 353-363.

- [5] Stagg, G.W. and El-Abiad, A.H.: "Computer Methods in Power System Analysis", Mc Graw-Hill Book Company, 1968.

- [6] Lindahl, S.: "A State Space Model of A Multimachine Power System", Report 7118, Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1971.

- [7] Farmer, E.D. and Potton, M.J.: "Development of online load-prediction techniques with results from trials in the south-west region of CEGB", Proc. IEE, Vol.115, No. 10, October 1968, pp. 1549-1558.

APPENDIX A: SIMNETIndata:

GAA, BAA, RAB, XAB, GBB, BBB,	}	Se appendix D	
LTA, LTB, PINJ, QINJ, VBR, VBI			
PL(K)	Realdelen av belastningen vid knutpunkt K		
QL(K)	Imaginärdelen av belastningen vid knutpunkt K		
RCOV	Kovariansmatrisen för bruset vid knutpunkt fem		
MAXTID	Antal sekunder simuleringen skall pågå		
H	Steglängd i sekunder		
HRK	Steglängd för RK1ST i sekunder		
MAXIT	Se appendix D		
IPRINT	Se appendix D		
IPR	Se programhuvud		
IH	Antal H mellan utskrift		
IS	Se appendix D		
WO	w_0	}	
XD	x_d		
XDP	x'_d		
XQ	x_q		
D1	D_1		
FK1	K_1		} Se avsnitt 4.2
FK2	K_2		
HT	H		
TDP	T'_{do}		
TR	T_r		
TG	T_g		

EIDLIB.SIMNET

```

C      IPR=0          FULLSTÄNKIG UTSKRIFT
C      IPR=1          BEGYNNELSEVÄRDEN, VÄRDEN MED INTERVALL IH SAMT
C                    FÖRSTA OCH SISTA VÄRDE I LAGRINGSMATRISEN
C      IPR=2          INGEN UTSKRIFT
C      IH             STEGLÄNGD I SEKUNDER
C      HRK            STEGLÄNGD FÖR RKIST
C      IN             ANTAL H MELLAN UTSKRIFT
C                    ANTAL KOLONNER I LAGRINGSMATRIS
C
C      PARAMETER NB=5, NL=7, NG=2, NA=2*NG, NBG=NB-NG, NT=5*NG, NLL=2*NL
C      1, NZ=4*NB+4*NL+1, NBB=2*NB, MV=NZ-NBR-1, NQQ=NBB+NLL
C      2, IN=50
C
C      COMPLEX Y(NB, NB), VB(NB), Y21(NBG, NBG), Y22(NBG, NBG), UL(NBG, NBG)
C      1, AA(NBG, NBG), YYY(NB, NB), SL, SLC, SLIN(NLL), YA(NG, NG), SINJ(NB), YNOD
C      2, LIN1
C
C      DIMENSION GAA(NL), BAA(NL), RAB(NL), XAB(NL), GBB(NL), BBB(NL), LTA(NL)
C      1, LTB(NL), PINJ(NB), QINJ(NB), VBR(NB), VBI(NB), PL(NB), QL(NB), X(5, NG)
C      2, XA(NT), VT(NB), IPS(30), PSI(NB), XL(2, 2), ETA(2), U(2), ETAU(2)
C      3, RCOV(2, 2), TDOB(NLL), XUTA(NT), XUT(5, NG), Z(NZ, IN)
C      4, R1(9), RR1(9), ZZ(9), ZZZ(9), D(9), PPSI(NB), NPI(NB)
C
C      EQUIVALENCE (X(1, 1), XA(1)), (XUTA(1), XUT(1, 1))
C
C      COMMON/KONST/ XD(NG), XDP(NG), XQ(NG), W0, D1(NG), FK1(NG), FK2(NG)
C      1, HT(NG), TDP(NG), TR(NG), TG(NG), UREF(2, NG), YREF(2, NG), C(NG), S(NG)
C      2, G(NG, NG), B(NG, NG), XV(NA)
C
C      EXTERNAL FUNC
C
C      DATA LP/6/, LF/70/, NODD/19/, ILOG/0/, IND/0/, PIH/1.5707963/
C      1, EPS/1.0E-6/, EPSJ/1.0E-7/, ITEST/0/, IKOL/0/
C      2, PII/3.14159265/
C
C      READ(5, 10) (GAA(L), BAA(L), RAB(L), XAB(L), GBB(L), BBB(L), LTA(L), LTB(L)
C      1, L=1, NL)
C      10 FORMAT(6F6.3, 2I3)
C      READ(5, 20) (PINJ(K), QINJ(K), PL(K), QL(K), VBR(K), VBI(K), K=1, NB)
C      20 FORMAT(6F5.2)
C      READ(5, 30) ((RCOV(I, J), J=1, 2), I=1, 2)
C      30 FORMAT(4E10.3)
C      READ(5, 40) MAXTID, H, HRK, MAXIT, IPRINT, IPR, IH, IS, W0,
C      1(XD(1), XDP(1), XQ(1), D1(1), FK1(1), FK2(1), HT(1), TDP(1), TR(1), TG(1)
C      2, I=1, NG)
C      40 FORMAT(I10, 2F10.1, 4I5/I5, F10.3/(10F5.2))
C
C      ANROP AV LASTFÖRDELNINGSPROGRAM
C
C      CALL NRLFR(GAA, BAA, RAB, XAB, GBB, BBB, LTA, LTB, PINJ, QINJ, VBR, VBI, EPS
C      1, NB, NL, IS, MAXIT, IPRINT, JFAIL, YYY, VB)
C      DO 50 I=1, NB
C      DO 50 J=1, NB
C      50 Y(I, J)=YYY(I, J)
C
C      BERÄKNING AV BEGYNNELSEVÄRDEN
C
C      IF(IPR=1) 60, 60, 110
C      60 WRITE(LP, 70) (PL(K), QL(K), K=1, NB)
C      70 FORMAT(///7H INDATA/1X, 6(1H-)/
C      1, 21H          PL(1)          QL(1)
C      2, 20H          PL(2)          QL(2)
C      3, 20H          PL(3)          QL(3)

```

```

4,20H      PL(4)      QL(4)
5,20H      PL(5)      QL(5)
6/1X,10F10.5)
WRITE(LP,80)MAXTID,H,HRK,MAXIT,IPRINT,IPR,IH,IS,W0
80 FORMAT(/11H      MAXTID
1,10H      H
2,10H      HRK
3,10H      MAXIT
4,10H      IPRINT
5,10H      IPR
6,10H      IH
7,10H      IS
8,10H      W0
9/1X,110,2F10.2,5110,F10.3)
WRITE(LP,90)(XD(1),XDP(I),XQ(I),D1(I),FK1(I),FK2(I),HT(I),TDP(I)
1,TR(I),TG(I),I=1,NG)
90 FORMAT(/11H      XD
1,10H      XDP
2,10H      XQ
3,10H      D1
4,10H      FK1
5,10H      FK2
6,10H      HT
7,10H      TDP
8,10H      TR
9,10H      TG
1/(1X,10F10.3))
WRITE(LP,100)
100 FORMAT(/17H BEGYNNEI SEVARDEN/1X,16(1H-)/
110H      GEN
2,15H      X(1,I)
3,15H      X(2,I)
4,15H      X(3,I)
5,15H      X(4,I)
6,15H      X(5,I)
7)
110 DO 120 I=1,2
DO 120 J=1,2
120 XL(I,J)=0
DO 130 I=1,NG
VT(I)=CABS(VB(I))
PGEN=PL(I)+PINJ(I)
QGEN=QL(I)+QINJ(I)
S6=SQR(PGEN**2+QGEN**2)
TI=S6/VT(I)
XX=VT(I)*PGEN/S6
YY=VI(I)*QGEN/S6+XQ(I)*TI
YX=YY/XX
QP=QGEN/PGEN
VIR=VBI(I)/VBR(I)
DELFI=ATAN(YX)
DELTA=DELFI-ATAN(QP)
X(1,I)=DELTA+ATAN(VIR)-PIH
X(2,I)=1
VD=VI(I)*SIN(DELTA)
VQ=VI(I)*COS(DELTA)
D1=TI*SIN(DELFI)
X(3,I)=XDP(I)*D1+VQ/X(2,I)
FI=(XD(I)*X(3,I)-(XD(I)-XDP(I))*VQ/X(2,I))/XDP(I)
X(4,I)=FI
X(5,I)=PGEN
UREF(1,I)=FI
UREF(2,I)=PGEN
YREF(1,I)=VT(I)

```

```

      YREF(2,1)=1
      IF(IPR-1) 130,130,180
130  WRITE(LP,140) I, (A(J,I), J=1,5)
140  FORMAT(110,5F15.5)
      WRITE(LP,150)
150  FORMAT(//5H RCOV/1X,6(1H-))
      CALL MAPRI(RCOV,2,2,2)
160  WRITE(LP,170)
170  FORMAT(7HOUTPUTDATA/1X,6(1H-)/
      14H NOD
      2,10H      V
      3,10H      PSI
      4,10H      PINJ
      5,10H      QINJ
      6,12H      J P(1,J)
      7,10H      Q(1,J)
      8,12H      J P(1,J)
      9,10H      Q(1,J)
     10,12H      J P(1,J)
     11,10H      Q(1,J)
     12,12H      J P(1,J)
     13,10H      Q(1,J)
     14,10H      Q(1,J)
     15)
180  PLL=PL(5)
      QLL=QL(5)
      TAU1=-H/50
      TAU2=-H/500
      ETAU(1)=EXP(TAU1)
      ETAU(2)=EXP(TAU2)
      NRKII=H/HRK
      RAMP=0.005/60.0
      SIGMA=1.0/10.8314
      IF(IPR.EQ.2) ITES1=1
      DO 185 I=1,9
185  RRI(1)=0
      DO 187 I=1,NB
      NPI(1)=0
187  PPSI(1)=0.0
      T=0.0
C
C   MODIFIERING AV Y5*5 MED HANSYN TILL LASTEN
C
190  DO 200 I=1,NB
      VT(I)=CABS(VB(I))
      SL=CMPLX(PL(I),QL(I))
      SLC=CONJG(SL)
200  T(I,1)=YYY(I,I)+SLC/(VT(I)**2)
C
C   BILDA Y2*2
C
      DO 220 I=1,NBG
      DO 210 J=1,NB
210  Y21(I,J)=Y(I+NB,J)
      DO 220 J=1,NBG
220  Y22(I,J)=Y(I+NB,J+NB)
      CALL CDECOM(Y22,UL,IPS,NBG,NBG,EP5D,ISING)
      IF(ISING) 230,250,230
230  WRITE(LP,240)
240  FORMAT(15H Y22 SINGULAR)
      STOP
250  CALL CSOLVB(Y21,AA,UL,IPS,NBG,NB,NBG)
      DO 270 I=1,NB
      DO 270 J=1,NB
      YA(I,J)=Y(I,J)

```

```

DO 260 K=1,NBG
260 YA(I,J)=YA(I,J)-Y(I,K,NG)*AA(K,J)
G(I,J)=REAL(YA(I,J))
270 B(I,J)=AIMAG(YA(I,J))

```

```

C
C   BERÄKNING AV TILLSTÄND
C

```

```

DO 290 NKK=1,NKKIT
CALL RK1ST(T,XA,HRK,XUTA,NT,FUNC)
T=T+HRK
DO 280 I=1,NT
280 XA(I)=XUTA(I)
290 CONTINUE
IT=T+0.5
ITA=IT/IH
INA=IT/IN
IREST=IT-ITA*IH
INRE=IT-INA*IN
IKOL=IKOL+1
Z(NZ,IKOL)=IT
300 IF(IPR-1) 330,310,380
310 IF(IREST) 320,330,320
320 IF(INRE) 340,350,340
330 ITEST=0
340 IF(ITEST) 380,350,380
350 WRITE(LP,360)T
360 FORMAT(17H TILLSTÄND VID I=,F7.2)
DO 370 I=1,NG
WRITE(LP,370)I,(X(J,I),J=1,5)
370 FORMAT(I10,5F15.5)

```

```

C
C   BERÄKNING AV KNUTPUNKTSSPANNINGAR
C

```

```

380 DO 390 I=1,NG
VBR(I)=XV(I)*COS(X(1,I))-XV(I+NG)*SIN(X(1,I))
VBI(I)=XV(I)*SIN(X(1,I))+XV(I+NG)*COS(X(1,I))
390 VB(I)=CMPLX(VBR(I),VBI(I))
DO 410 I=NBG,NG
VB(I)=0
DO 400 J=1,NG
400 VB(I)=VB(I)-AA(I-NG,J)*VB(J)
VBR(I)=REAL(VB(I))
410 VBI(I)=AIMAG(VB(I))

```

```

C
C   BERÄKNING AV UTDATA
C

```

```

NNE=0
KK=1
DO 490 I=1,NG
SINH(I)=0
VI(I)=CABS(VB(I))
VIR=VBI(I)/VBR(I)
IF(ABS(VBR(I))-1.0E-3) 416,416,411
411 PSI(I)=ATAN(VIR)
412 PPP=PSI(I)-PPSI(I)
IF(ABS(PPP)-1.8) 417,413,413
413 IF(PPP) 414,415,415
414 NPI(I)=NPI(I)+1
GO TO 417
415 NPI(I)=NPI(I)-1
GO TO 417
416 PPI(I)=PI
GO TO 412
417 PSI(I)=PSI(I)+NPI(I)*PI

```



```

419 PPSI(I)=PSI(I)
      Z(I+MV,IKOL)=VT(I)
      Z(I+MV+NB,IKOL)=PSI(I)
      DO 460 L=1,NL
420   IF(LTA(L)-I) 420,430,420
430   J=LTB(L)
      YNOD=CMPLX(GAA(L),BAA(L))
      GO TO 450
440   J=LTA(L)
      YNOD=CMPLX(GBB(L),BBB(L))
450   NN=NN+1
      NODB(NN)=J
      LINI=(VB(J)-VB(I))*Y(I,J)+VB(I)*YNOD
      SLIN(NN)=VB(I)*CONJG(LINI)
      SINJ(I)=SINJ(I)+SLIN(NN)
      Z(NN+NB,IKOL)=REAL(SLIN(NN))
      Z(NN+NB,IKOL)=AIMAG(SLIN(NN))
460 CONTINUE
      Z(I,IKOL)=REAL(SINJ(I))
      Z(I+NB,IKOL)=AIMAG(SINJ(I))
      IF(ITEST) 490,470,490
470 WRITE(LP,480)I,VT(I),PSI(I),SINJ(I),(NODB(K),SLIN(K),K=KK,NN)
      KK=NN+1
480 FORMAT(1X,I3,4F10.5,4(I4,F8.5,F10.5))
490 CONTINUE
      DO 492 I=1,4
      THETA=PSI(1)-PSI(5)
      ZZZ(1)=VT(1)*COS(THETA)
492 ZZZ(1+NB)=VT(1)*SIN(THETA)
      ZZZ(NB)=VT(NB)
      IF(I1.EQ.1) GO TO 496
      DO 494 I=1,9
      D(I)=ZZZ(1)-ZZ(I)
      RR1(I)=RR1(I)+D(I)**2
494 R1(I)=RR1(I)/(I-1.0)
496 DO 498 I=1,9
498 ZZ(I)=ZZZ(I)
      WRITE(LP,499)R1
499 FORMAT(3H R1,4X,9E10.3)
      ITFST=1
      IF(INRE) 510,500,510
500 WRITE(LP)Z
      ITFST=0
      IKOL=0
510 IF(I1.EQ.4MAXTID) STOP
C
C   BERÄKNING AV ETA
C
      CALL MNOD1(0,RCOV,2,2,NODD,ILOG,IND)
      IF(IND) 520,540,520
520 WRITE(LP,530)
530 FORMAT(14H RCOV SINGULAR)
      STOP
540 DO 550 I=1,2
      XL(1,I)=ETAU(1)*XL(1,I)+50*(1-ETAU(1))*U(I)*SIGMA
      XL(2,I)=ETAU(2)*XL(2,I)+500*(1-ETAU(2))*U(I)*SIGMA
550 ETA(1)=0.4*XL(1,1)+0.6*XL(2,1)
C
C   MODIFIERING AV LASTEN
C
      PLL=PLL-RAMP*0.60*H
      QLL=QLL-RAMP*0.10*H
      PL(5)=PLL+ETA(1)

```

A7

```
QL(5)=QLL+ETA(Z)  
GO TO 190  
END
```

UNEID*UNEIDLIB.FUNC

APPENDIX B: FUNC

Indata fås via COMMON-blocket KONST från huvudprogrammet SIMNET. FUNC anropas av rutinen RK1ST i SIMNET och i ett annat COMMON-block FUNCT, som ingår både i FUNC och RK1ST, lagrar FUNC derivatorna av tillstånden (Z). I FUNCT finns även tiden T och tillstånden X.

EIDLIB.FUNC

SUBROUTINE FUNC

```

C
C   PARAMETER NG=2,NA=2*NG,NBB=1
C
C   COMMON/FUNCT/T,X,Z
C
C   COMMON/KO,SI/ X(NG),XDP(NG),XQ(NG),W0,D1(NG),FK1(NG),FK2(NG)
1,HT(NG),TDP(NG),TR(NG),TG(NG),UREF(2,NG),YREF(2,NG),C(NG),S(NG)
2,G(NG,NG),B(NG,NG),XV(NA)
C
C   DIMENSION A(NA,NA),BB(NA),FI(NG),DI(NG),QI(NG),PE(NG),Y1(NG)
1,Y2(NG),X(5,NG),Z(10),GA(NG,NG),BA(NG,NG)
C
C   DATA LP/6/,EPS/1.0E-7/
C
C   TRANSFORMATION AV Y2*5 TILL GENERATORREFERENS.
C   MODIFIERING AV YP2*2 MED HANSYN TILL GEN
C
DO 10 I=1,NG
C(I)=COS(X(1,I))
10 S(I)=SIN(X(1,I))
DO 50 I=1,NG
DO 45 J=1,NG
GA(I,J)=C(I)*G(I,J)*C(J)+S(I)*G(I,J)*S(J)+S(I)*B(I,J)*C(J)
1-C(I)*B(I,J)*S(J)
BA(I,J)=C(I)*B(I,J)*C(J)+S(I)*B(I,J)*S(J)+C(I)*G(I,J)*S(J)
1-S(I)*G(I,J)*C(J)
A(I,J)=GA(I,J)
A(I+NG,J+NG)=GA(I,J)
IF(I-J) 30,20,30
20 A(I,J+NG)=1/(XDP(I)*X(2,I))-BA(I,J)
A(I+NG,J)=BA(I,J)-1/(XQ(I)*X(2,I))
GO TO 45
30 A(I,J+NG)=-BA(I,J)
40 A(I+NG,J)=BA(I,J)
45 CONTINUE
BB(I)=X(3,I)/XDP(I)
50 BB(I+NG)=0
C
C   BERÄKNING AV V0 OCH V0
C
ISING=0
CALL DECOM(A,NA,NA,EPS,ISING)
IF(ISING) 60,80,60
60 WRITE(LP,70)
70 FORMAT(11H A SINGULAR)
80 CALL SOLVR(BB,XV,NA,NBB,NA)
C
C   BERÄKNING AV I, PE OCH DERIVATOR
C
DO 90 I=1,NG
J=(I-1)*5
FI(I)=(XD(I)*X(3,I)-(XD(I)-XDP(I))*XV(I+NG)/X(2,I))/XDP(I)
DI(I)=X(3,I)/XDP(I)-XV(I+NG)/(X(2,I)*XDP(I))
QI(I)=XV(I)/(X(2,I)*X0(I))
PE(I)=XV(I+NG)*QI(I)+XV(I)*DI(I)
Y1(I)=SQRT(XV(I)**2+XV(I+NG)**2)
Y2(I)=X(2,I)
Z(J+1)=W0*(X(2,I)-1)
Z(J+2)=0.5*((X(5,I)-PE(I))/X(2,I)-D1(I)*(X(2,I)-1))/HT(I)
Z(J+3)=(X(4,I)-FI(I))/TDP(I)
Z(J+4)=(UREF(1,I)-X(4,I)+FK1(I)*(YREF(1,I)-Y1(I)))/TR(I)
90 Z(J+5)=(UREF(2,I)-X(5,I)+FK2(I)*(YREF(2,I)-Y2(I)))/TG(I)

```

RETURN
END

ONEID*ONEIDLIB*NRLFR

APPENDIX C: NETEST och NETDIGIndata:

GAA, BAA, RAB, XAB, GBB,	}	Se appendix D
BBB, LTA, LTB, VBR, VBI		
MAXTID	Antal sekunder tillståndsestimeringen skall pågå	
IH	Steglängd i sekunder	
IPR	Se programhuvud	
MAXIT	}	Se appendix D
IPRINT		
IS		
RZ	Se programhuvud	
R1	R_1 -matrisen	
IMAT	Vektor som innehåller numren på de mätvärden som skall behandlas	
Z	Inläsningsblock som består av IN vektorer med mätvärden, där IN är PARAMETER	
Z(1,-) - Z(5,-)	PINJ(1)-PINJ(5)	Knutpunktseffekter
Z(6,-) - Z(10,-)	QINJ(1)-QINJ(5)	
Z(11,-)-Z(24,-)	Realdelarna av linjeeffekterna	
Z(25,-)-Z(38,-)	Imaginärdelarna av linjeeffekterna	
Z(39,-)-Z(43,-)	Knutpunktsspänningar	
Z(44,-)-Z(48,-)	Knutpunktsspänningarnas fasvinkel	
Z(49,-)	Tidpunkt då mätvektorn lagrades	

EIDLIG.NETEST

```

C      IH          STEGLÄNGEN I SEKUNDER
C      IN          ANTAL KOLONNER I BUFFERTMATRIS
C      NB          ANTAL KNUTPUNKTER
C      NL          ANTAL LEDNINGAR
C      RZ(I)       VID INMATNING: STANDARDAVVIKELSEN FÖR MÄTVARDE I
C                  I PROGRAMMET: VARIANSEN FÖR MÄTVARDE I
C      IPR=0       FULLSTÄNDIG UTSKRIFT
C      IPR=1       BEGYNNELSEVÄRDEN OCH RESULTAT
C      IPR=2       INGEN UTSKRIFT
C
C      PARAMETER  NB=5, NL=7, NCC=2*NB, NLL=2*NL, NPP=NCC+1, NBB=NCC+NLL
1, RZ=4*NB+4*NL+1, MV=NZ-NB-1, MHV=17, NBB=NCC-1, ND=NB-1, MWW=2*MHV
2, HDD=MV-NB
3, IH=50
C
C      COMPLEX Y(NB,NB), VB(NB), IB(NB), IL, SL, SM, YNOD
C
C      DIMENSION  GAA(NL), BAA(NL), RAB(NL), XAB(NL), GBB(NL), BBB(NL), LTA(NL)
1, LTB(NL), PINJ(NB), QINJ(NB), VBR(NB), VBI(NB), RZ(MV)
2, RW1(MHV, MHV), RW2(MHV, MHV), RZZ(NBB, NBB), U(MV), U1(MHV), U2(MHV)
3, A(NCC, NCC), F(MV, NBB), Z(NZ, IN), ZO(MV), XO(NBB), DZ(MV), DX(NBB)
4, XX(NBB), P(NBB, NBB), C(NBB, NBB), CT(NBB, NBB), W(NBB), XXX(NBB)
5, EPSX(NBB), SIGMAX(NBB), IMAT(MV), VT(NB), PSI(NB), R1(NBB)
6, U3(NBB), RW3(NBB, NBB), F11(ND), XXA(NB), XOA(NB), DV(NB), DF1(NB)
7, ZZ(MV), EOS(NBB), SX(NBB)
C
C      EQUIVALENCE (U1(1), U(1)), (U2(1), U(1+MHV)), (ZO(1), PINJ(1))
1, (ZO(1+NB), QINJ(1)), (U3(1), U(1+MWW))
C
C      DATA LP/6/, LF/70/, EPS/1.0E-6/, EPSD/1.0E-7/
1, IT/0/, IKOL/0/, NLIN/0/, ITEST/0/, NODD1/19/, NODD2/19/, IBEG/0/
2, NODD3/19/, DVMAX/0.05/, DFIMAX/0.17/
C
C      READ(5,10) (GAA(L), BAA(L), RAB(L), XAB(L), GBB(L), BBB(L), LTA(L), LTB(L)
1, L=1, NL)
10  FORMAT(6F6.3, 2I3)
C      READ(5,20) (VBR(K), VBI(K), K=1, NB)
20  FORMAT(2F5.2)
C      READ(5,30) MAXID, IH, IPR, MAXIT, IPRINT, IS
30  FORMAT(6I10)
C      READ(5,40) RZ
40  FORMAT(8F10.3)
C      READ(5,45) R1
45  FORMAT(8E10.3)
C      READ(5,50) IMAT
50  FORMAT(26I3)
C
C      BILDA KOVARIANSMATRISERNA RW1, RW2, RZZ
C
C      DO 55 I=1, MV
C      ZO(I)=0.0
55  RZ(I)=RZ(I)**2
C      DO 60 I=1, MHV
C      DO 60 J=1, MHV
C      K=1(I, J)=0.0
60  RW2(I, J)=0.0
C      DO 70 I=1, MHV
C      RW1(I, I)=RZ(I)
70  RW2(I, I)=RZ(1+MHV)
C      DO 80 I=1, NBB
C      DO 80 J=1, NBB
C      RW3(I, J)=0.0
80  RZZ(I, J)=0.0

```

```

DO 90 I=1,NBB
EQS(I)=0.0
RW3(I,I)=RZ(I+MWW)
90 RZZ(I,I)=RZ(I)
C
C   INLÅSNING AV MATVÄRDEn
C
READ(LF)Z
95 IT=IT+IH
IKOL=IKOL+IH
IF(IKOL.LE.IN) GO TO 100
IKOL=IKOL-IN
READ(LF)Z
100 ILOG=0
CALL MNODI(U1,RW1,MHV,MHV,NODD1,ILOG,IND)
ILOG=0
CALL MNODI(U2,RW2,MHV,MHV,NODD2,ILOG,IND)
ILOG=0
CALL MNODI(U3,RW3,NBB,NBB,NODD3,ILOG,IND)
IF(IND) 105,115,105
105 WRITE(LP,110)
110 FORMAT(' RW SINGULAR ')
GO TO 900
115 DO 116 I=1,MV
ZZ(I)=Z(I,IKOL)+U(I)
116 DZ(I)=ZZ(I)-Z0(I)
C
C   VAL AV BERÄKNINGSSCHEMA
C
MS1=MSLEFT(XMS)
IF(IBEG.EQ.0) GO TO 130
DVV=0.0
DFII=0.0
DO 120 I=1,NB
XXA(I)=SQRT(XX(I)**2+X(I+NB)**2)
X0A(I)=SQRT(X0(I)**2+X0(I+NB)**2)
DV(I)=XXA(I)-X0A(I)
DFI(I)=ATAN2(XX(I+NB),XX(I))-FII(I)
120 DFI(I)=ABS(DFI(I))
DV(NB)=XX(NB)-X0(NB)
DFI(NB)=0.0
DO 125 I=1,NB
DVV=AMAX1(DVV,DV(I))
125 DFII=AMAX1(DFI1,DFI(I))
IF(DFII.GT.DFIMAX) GO TO 130
IF(DVV.GT.DVMAX) GO TO 130
MM=1
MS2=MSLEFT(XMS)
GO TO 470
C
C   LASTFÖRDELNINGSPROGRAM
C
130 DO 135 I=1,MV
Z0(I)=ZZ(I)
135 DZ(I)=0.0
DO 140 I=1,NBB
140 DX(I)=0.0
NLIN=NLIN+1
IF(IBEG.EQ.0) GO TO 145
VBR(1S)=SQRT(XX(1S)**2+XX(1S+NB)**2)
VBI(1S)=0.0
145 CALL NRLFR(GAA,BAA,RAB,XAB,GBB,BBB,LTA,LTB,PINJ,QINJ,VBR,VBI,EPS
I,NB,NL,IS,MAXII,IPRINT,JFAIL,Y,VB)
IF(JFAIL) 150,190,170

```



```

150 WRITE(LP,160)
160 FORMAT(41H INGEN KONVERGENS EFTER MAXIT ITERERINGAR)
    GO TO 900
170 WRITE(LP,180)
180 FORMAT(21H JACCOBIANEN SINGULAR)
    GO TO 900
190 FI=ATAN2(VBI(NB),VBR(NB))
    DO 200 I=1,NB
      XO(I)=VBR(I)*COS(FI)+VBI(I)*SIN(FI)
      XO(I+NB)=VBI(I)*COS(FI)-VBR(I)*SIN(FI)
200  FII(1)=ATAN2(XO(1+NB),XO(1))
      XO(NB)=VBR(NB)*COS(FI)+VBI(NB)*SIN(FI)
    DO 205 I=1,NBB
205  XX(I)=XO(I)
      IF(IBE6.NE.0) GO TO 260
      IF(IPR=1) 210,210,260
210  WRITE(LP,220)MAXTID,1,IPR,MAXIT,1PRINT,IS
220  FORMAT(7H1INDATA/1X,6(1H-)/
    11H      MAXTID
    2,10H      IH
    3,10H      IPR
    4,10H      MAXIT
    5,10H      1PRINT
    6,10H      IS
    7/1X,8I10)
      WRITE(LP,230)R2
230  FORMAT(//32H DIAGONALEN AV KOVARIANSMATRISEN//
    1(1X,12E10.3))
      WRITE(LP,235)R1
235  FORMAT(//17H DIAGONALEN AV R1//1X,9E10.3)
240 WRITE(LP,250)IMAT
250  FORMAT(//18H VAL AV MATPUNKTER//
    11X,43I3)
      WRITE(LP,255)ZO,XO
255  FORMAT(///17H BEGYNNELSEVARDEN/1X,16(1H-)/
    13H ZO/3(1X,12F10.5/),1X,7F10.5/
    23H XO/1X,10F10.5)

```

```

C
C   BERÄKNING AV A-MATRIS
C

```

```

260 DO 290 I=1,NB
      IB(I)=(0.0,0.0)
      DO 270 J=1,NB
270  IB(I)=IB(I)+Y(I,J)*VB(J)
      DO 290 J=1,NB
      SL=VB(I)*CONJG(Y(I,J))
      A(I,J)=REAL(SL)
      A(I,J+NB)=AIMAG(SL)
      A(I+NB,J)=AIMAG(SL)
      A(I+NB,J+NB)=-REAL(SL)
      IF(I=J) 290,280,290
280  A(I,1)=A(I,1)+REAL(IB(I))
      A(I,1+NB)=A(I,1+NB)+AIMAG(IB(I))
      A(I+NB,1)=A(I+NB,1)-AIMAG(IB(I))
      A(I+NB,1+NB)=A(I+NB,1+NB)+REAL(IB(I))
290 CONTINUE

```

```

C
C   BEGYNNELSEVARDE FÖR P
C
      CALL DECOM(A,NBB,NCC,PSD,ISING)
      IF(ISING) 300,320,300
300 WRITE(LP,310)
310 FORMAT(11H A SINGULAR)
    GO TO 900

```

```

320 CALL SOLVB(RZZ,C,NBB,NBB,NBB)
   DO 330 I=1,NBB
   DO 330 J=1,NBB
330 CT(I,J)=C(J,I)
   CALL SOLVB(CT,P,NBB,NBB,NBB)
   IF(IBE6.NE.0) GO TO 360
   IF(IPR=1) 340,340,360
340 WRITE(LP,350)((P(I,J),J=1,NBB),I=1,NBB)
350 FORMAT(/9H P=MATRIS/(1X,9F10.5))

```

```

C
C   BERÄKNING AV F-MATRIS
C

```

```

360 NN=0
   DO 380 J=1,NBB
   DO 370 I=1,NCC
370 F(I,J)=A(I,J)
   DO 380 I=NPP,MV
380 F(I,J)=0.0
   DO 430 I=1,NB
   DO 430 L=1,NL
   IF(LIA(L)=1) 390,400,390
390 IF(LIB(L)=1) 430,410,430
400 J=LTA(L)
   YNOD=CMPLX(GAA(L),BAA(L))
   GO TO 420
410 J=LTA(L)
   YNOD=CMPLX(GBB(L),BBB(L))
420 NN=NN+1
   IL=(VB(J)-VB(1))*Y(I,J)+VB(1)*YNOD
   SL=CONJG(VB(1))*(Y(I,J)-YNOD)
   SM=VB(J)*CONJG(Y(I,J))
   F(NN+NCC,1)=-REAL(SL)+REAL(IL)
   F(NN+NCC,J)=REAL(SM)
   F(NN+NBBL,1)=AIMAG(SL)-AIMAG(IL)
   F(NN+NBBL,J)=AIMAG(SM)
   IF(I+NB.GT.NBB) GO TO 425
   F(NN+NCC,I+NB)=AIMAG(SL)+AIMAG(IL)
   F(NN+NBBL,I+NB)=REAL(SL)+REAL(IL)
425 IF(J+NB.GT.NBB) GO TO 430
   F(NN+NCC,J+NB)=AIMAG(SM)
   F(NN+NBBL,J+NB)=-REAL(SM)
430 CONTINUE
   DO 435 I=1,ND
   F(I+NDD,1)=COS(FII(I))
435 F(I+NDD,I+NB)=SIN(FII(I))
   F(MV,NB)=1.0
   IF(IBE6.NE.0) GO TO 582
   IF(IPR=1) 440,440,462
440 WRITE(LP,441)
441 FORMAT(9H1F=MATRIS/)
   DO 445 I=1,MV
445 WRITE(LP,450)I,(F(I,J),J=1,NBB)
450 FORMAT(7H RAD NR,I3,1X,9F10.5)
   WRITE(LP,460)
460 FORMAT(7H10UTDATA/1X,6(1H-)/)
462 IBE6=1
   MS3=MSLEFT(XMS)
   MSS1=MS1-MS3
   GO TO 582

```

```

C
C   SEKVENS-BEARBEITNING
C

```

```

470 IF(IMAT(NN).EQ.0) GO TO 580
   KK=IMAT(NN)

```

```

480 SUM=0.0
DO 490 I=1,NBB
  W(I)=0.0
  DO 490 J=1,NBB
    SUM=SUM+F(KK,I)*P(I,J)*F(KK,J)
490  W(I)=W(I)+P(I,J)*F(KK,J)
    SUM=SUM+R2(KK)
  DO 500 I=1,NBB
500  W(I)=W(I)/SUM
    SUM=0.0
  DO 510 I=1,NBB
510  SUM=SUM+F(KK,I)*DX(I)
    SUM=DZ(KK)-SUM
  DO 540 I=1,NBB
    DX(I)=DX(I)+W(I)*SUM
  DO 540 J=1,NBB
    IF(I=J) 530,520,530
520  C(I,J)=1-W(I)*F(KK,J)
    GO TO 540
530  C(I,J)=-W(I)*F(KK,J)
540  CT(I,J)=P(I,J)
  DO 570 I=1,NBB
  DO 560 J=1,NBB
    SUM=0.0
  DO 550 L=1,NBB
550  SUM=SUM+C(I,L)*CT(L,J)
560  P(I,J)=SUM
570  XX(I)=X0(I)+DX(I)
  IF(IPR) 580,571,580.
571  WRITE(LP,572)IT,IKOL,KK
572  FORMAT(/4H IT=,I4,8H IKOL=,I3,6H KK=,I3)
  WRITE(LP,573)XX,DX
573  FORMAT(8X,3H XX,9F10.5/8X,3H DX,9F10.5)
  WRITE(LP,574)((P(I,J),J=1,NBB),I=1,NBB)
574  FORMAT(9H P=MATRIX/(1X,9F10.5))
580  MM=MM+1
  IF(MM.LE.MV) GO TO 470
  DO 581 I=1,NBB
581  P(I,I)=P(I,I)+R1(I)
  MS4=MSLEFT(XMS)
C
C   JÄMFÖRELSE OCH UTSKRIFT
C
582  IF(I.EST) 660,585,660
585  DO 587 I=1,NB
  VT(I)=Z(I+ND0,IKOL)
587  PSI(I)=Z(I+NV,IKOL)
  DO 590 I=1,NB
  PSI(I)=PSI(I)-PSI(NB)
  XXX(I)=VT(I)*COS(PSI(I))
590  XXX(I+NB)=VT(I)*SIN(PSI(I))
  XXX(NB)=VT(NB)
  DO 600 I=1,NBB
  EPSX(I)=XXX(I)-XA(I)
  EQS(I)=EQS(I)+EPSX(I)*2
  EE=EQS(I)/IT
  SX(I)=SQRT(EE)
600  SIGMAX(I)=SQRT(P(I,I))
610  WRITE(LP,620)IT,NLIN
620  FORMAT(18H TILLSTAND VID IT=,I8,5X,6H NLIN=,I4)
  IF(IPR) 625,622,625
622  WRITE(LP,623)(Z(I,IKOL),I=1,NZ)
623  FORMAT(2H Z,9X,12F10.5)
625  WRITE(LP,630)(XX(I),I=1,NBB)

```

```
630 FORMAT(3H XX,8X,10F10.5)
      WRITE(LP,640)(EPSX(I),I=1,NBB)
640 FORMAT(5H EPSX,6X,10F10.5)
      WRITE(LP,645)(SX(I),I=1,NBB)
645 FORMAT(3H SX,8X,9F10.5)
      WRITE(LP,650)(SIGMAX(I),I=1,NBB)
650 FORMAT(7H SIGMAX,4X,10F10.5)
660 IF(IT.NE.NAXTID) GO TO 95
```

C

```
900 IF(IPR-1) 905,905,920
905 WRITE(LP,910)NLIN
910 FORMAT(/6H NLIN=,I5)
      MSS2=MS2-MS4
      WRITE(LP,915)MSS1,MSS2
915 FORMAT(/6H MSS1=,I5,5X,6H MSS2=,I5)
920 STOP
      END
```

.NEID*UNEIDLIB.NET,IG

```
480 SUM=0.0
```

```
DO 490 I=1,NBB
```

```
SUM=SUM+F(KK,I)*P(I,I)*F(KK,I)
```

```
490 W(I)=P(I,I)*F(KK,I)
```

```
SUM=SUM+RZ(KK)
```

```
DO 500 I=1,NBB
```

```
500 W(I)=W(I)/SUM
```

```
SUM=0.0
```

```
DO 510 I=1,NBB
```

```
510 SUM=SUM+F(KK,I)*DX(I)
```

```
SUM=DZ(KK)-SUM
```

```
DO 540 I=1,NBB
```

```
DX(I)=DX(I)+W(I)*SUM
```

```
540 C(I,I)=1-W(I)*F(KK,I)
```

```
DO 570 I=1,NBB
```

```
P(I,I)=C(I,I)*P(I,I)
```

```
570 XX(I)=X0(I)+DX(I)
```

```
IF(IPR) 580,571,580
```

```
571 WRITE(LP,572)IT,IKOL, KK
```

```
572 FORMAT(/4H IT=,I4,8H IKOL=,I3,6H KK=,I3)
```

```
WRITE(LP,573)XX,DX
```

```
573 FORMAT(8X,3H XX,9F10.5/8X,3H DX,9F10.5)
```

```
WRITE(LP,574)((P(I,J),J=1,NBB),I=1,NBB)
```

```
574 FORMAT(9H P-MATRIX/(1X,9F10.5))
```

```
580 MM=MM+1
```

```
IF(MM.LE.MV) GO TO 470
```

```
DO 581 I=1,NBB
```

```
581 P(I,I)=P(I,I)+R1(I)
```

```
MS4=MSLEFT(XMS)
```

C

C

```
JÄMFÖRELSE OCH UTSKRIFT
```

C

```
582 IF(I1EST) 660,585,660
```

```
585 DO 587 I=1,NB
```

```
VI(I)=Z(I+NDD,IKOL)
```

```
587 PSI(I)=Z(I+MV,IKOL)
```

```
DO 590 I=1,NB
```

```
PSI(I)=PSI(I)-PSI(NB)
```

```
XXX(I)=VI(I)*COS(PSI(I))
```

```
590 XXX(I+NB)=VI(I)*SIN(PSI(I))
```

```
XXX(NB)=VI(NB)
```

```
DO 600 I=1,NBB
```

```
LPSX(I)=XXX(I)-XX(I)
```

```
EQS(I)=EQS(I)+LPSX(I)**2
```

```
LE=EQS(I)/IF
```

```
SX(I)=SQRT(LE)
```

```
600 SIGMAX(I)=SQRT(P(I,I))
```

```
610 WRITE(LP,620)IT,NLIN
```

```
620 FORMAT(18H TILLSTAND VID IT=,I8,5X,6H NLIN=,I4)
```

```
IF(IPR) 625,622,625
```

```
622 WRITE(LP,623)(Z(I,IKOL),I=1,NZ)
```

```
623 FORMAT(2H Z,9X,12F10.5)
```

```
625 WRITE(LP,630)(XX(I),I=1,NBB)
```

```
630 FORMAT(3H XX,8X,10F10.5)
```

```
WRITE(LP,640)(LPSX(I),I=1,NBB)
```

```
640 FORMAT(5H LPSX,6X,10F10.5)
```

```
WRITE(LP,645)(SX(I),I=1,NBB)
```

```
645 FORMAT(3H SX,8X,9F10.5)
```

```
WRITE(LP,650)(SIGMAX(I),I=1,NBB)
```

```
650 FORMAT(7H SIGMAX,4X,10F10.5)
```

```
660 IF(I1.NE.MAXTID) GO TO 95
```

C

```
900 IF(IPR=1) 905,905,920
```

```
905 WRITE(LP,910)NLIN
```

NETDIG

NETDIG är identiskt med NETEST utom för markerade satser.

Jämför sidan C 6.

EIDLIB,NRLFR

```

SUBROUTINE NRLFR(GAA,BAA,RAB,XAB,GBB,BBB,LTA,LTB,PINJ,QINJ,VBR,
1VBI,EPS,NB,NL,IS,MAXIT,IPRINT,JFAIL,Y,VB)

```

```

C
C   COMPUTES A SOLUTION TO
C
C   *****
C   * THE LOAD-FLOW PROBLEM USING *
C   * THE NEWTON-RAPHSON METHOD   *
C   * AND RECTANGULAR COORDINATES *
C   *****
C
C   REFERENCE, G.W. STAGG AND A.H. EL-ABIAD
C   'COMPUTER METHODS IN POWER SYSTEM ANALYSIS'
C   CHAPTER 8, NEW YORK, 1968
C
C   AUTHOR, STURE LINDAHL 1972-03-12
C
C   GAA(*)      REAL PART OF SHUNT ADMITTANCE AT ENDPOINT A
C   BAA(*)      IMAGINARY PART OF SHUNT ADMITTANCE AT ENDPOINT A
C   RAB(*)      REAL PART OF LINE IMPEDANCES BETWEEN ENDPOINT A AND B
C   XAB(*)      IMAGINARY PART OF LINE IMPEDANCES BETWEEN ENDPOINT A AND B
C   GBB(*)      REAL PART OF SHUNT ADMITTANCE AT ENDPOINT B
C   BBB(*)      IMAGINARY PART OF SHUNT ADMITTANCE AT ENDPOINT B
C   LTA(*)      ENDPOINT A OF LINE I IS CONNECTED TO BUS LTA(I)
C   LTB(*)      ENDPOINT B OF LINE I IS CONNECTED TO BUS LTB(I)
C   PINJ(*)     ACTIVE POWER INJECTION AT BUS I
C   QINJ(*)     REACTIVE POWER INJECTION AT BUS I
C   VBR(*)      REAL PART OF BUS VOLTAGES
C   VBI(*)      IMAGINARY PART OF BUS VOLTAGES
C   EPS        THE ITERATION IS TERMINATED WHEN
C              THE MAXIMUM APPARENT POWER MISMATCH IS LESS THAN EPS
C   NB        NUMBER OF BUSES (MAX 16)
C   NL        NUMBER OF LINES (NO MAX)
C   IS        SLACK BUS NUMBER
C   MAXIT     MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS
C   IPRINT=0   MAXIMUM PRINTOUT
C   IPRINT=1   INPUT DATA, VOLTAGES AND APPARENT POWER MISMATCH AT
C              EACH ITERATION AS WELL AS THE FINAL RESULT IS PRINTED
C   IPRINT=2   NO PRINTOUT
C   JFAIL=-1   NO CONVERGENCE AFTER MAXIT ITERATIONS
C   JFAIL=0    THE SOLUTION IS FOUND
C   JFAIL=1    THE JACCOBIAN IS SINGULAR
C
C   SUBROUTINE REQUIRED
C           CMAPRI
C           DECOM
C           MAPRI
C           SOLVB
C
C   PARAMETER MB=5, MX=2*(NB-1)
C
C   COMPLEX Y(MB,MB),SMH(NB),VB(MB),DV(MB),IB(MB),
1ISA,SB,SL,FTT,HOLL,SIN,I
C
C   DIMENSION GAA(1),BAA(1),RAB(1),XAB(1),GBB(1),BBB(1),
1LTA(1),LTB(1),PINJ(1),QINJ(1),VBR(1),VBI(1),INDEX(MB),
2A(MX,MX),B(MX),X(MX)
C
C   DATA NOLL/(0.0,0.0)/,FTT/(1.0,0.0)/,LP/6/,JJAC/1/,EPSJ/1.0E-7/
C
C   IF(NB.GT.MB) GO TO 10
C   IF(NB) 10,10,30
10 WRITE(LP,20) NB

```

```

20 FORMAT(5H NB =,I5,9H IN NRLFP)
   GO TO 990
30 IF(NL) 40,40,60
40 WRITE(LP,50)
50 FORMAT(5H NL =,I5,9H IN NRLFP)
   GO TO 990
60 IF(IPRINT-1) 70,70,200
70 WRITE(LP,80)
80 FORMAT(20H1PRINTOUT FROM NRLFR/1X,19(1H*)//
123H TRANSMISSION-LINE DATA/1X,22(1H-)/
210H      LINE
3,10H      A-END
4,10H      B-END,5X
5,15H      GAA
6,15H      BAA
7,15H      RAB
8,15H      XAB
9,15H      GBB
1,15H      BBB
2)
   DO 90 I=1,NL
90 WRITE(LP,100) I,LT A(I),LT B(I),GAA(I),BAA(I),RAB(I),XAB(I),
1GBB(I),BBB(I)
100 FORMAT(3I10,6F15.5)
   WRITE(LP,110)
110 FORMAT(42H1INITIAL BUS VOLTAGES AND POWER INJECTIONS/
11X,41(1H-)/
110H      BUS
2,15H      REAL(VB(I))
3,15H      IMAG(VB(I))
4,15H      PINJ(I)
5,15H      QINJ(I)
6)
   DO 160 I=1,NB
   IF(I-IS) 120,140,120
120 WRITE(LP,130) I,VBR(I),VBI(I),PINJ(I),QINJ(I)
130 FORMAT(I10,4F15.5)
   GO TO 160
140 WRITE(LP,150) I,VBR(I),VBI(I)
150 FORMAT(I10,2F15.5,5X,10H SLACK BUS)
160 CONTINUE
C
C   FORM YBUS-MATRIX
C
200 DO 210 I=1,NB
   DO 210 J=1,NB
210 Y(I,J)=HOLL
   DO 220 I=1,NL
   SL=ETT/CMPLX(RAB(I),XAB(I))
   SA=SL+CMPLX(GAA(I),BAA(I))
   SB=SL+CMPLX(GBB(I),BBB(I))
   II=LT A(I)
   JJ=LT B(I)
   Y(II,JJ)=Y(II,JJ)-SL
   Y(JJ,II)=Y(JJ,II)-SL
   Y(II,II)=Y(II,II)+SA
220 Y(JJ,JJ)=Y(JJ,JJ)+SB
   IF(IPRINT) 230,230,250
230 WRITE(LP,240)
240 FORMAT(12H1YBUS-MATRIX/1X,11(1H-)/)
C
C   CALL CMAPRI(Y,NB,NB,MB)
C
C   COMPUTE BUS INDEX

```

```

C
250 II=1
    DO 270 I=1,NB
        IF(I-IS) 260,270,260
260 INDEX(II)=I
    II=II+1
270 VB(I)=CMPLX(VBK(I),VBI(I))
    IJAC=IJAC-1
    JFAIL=0
    NX=NB-1
    NXX=2*NX
    DV(IS)=NULL
C
C     START THE ITERATION
C
    DO 570 K=1,MAXIT
C
C     COMPUTE APPARENT POWER MISMATCH
C
    SMMM=0.0
    DO 340 I=1,NB
        SL=NULL
        DO 310 J=1,NB
310 SL=SL+Y(I,J)*VB(J)
        IB(I)=SL
        SINJ=VB(I)*CONJG(SL)
        IF(I-IS) 330,320,330
320 PINJ(I)=REAL(SINJ)
        QINJ(I)=AIMAG(SINJ)
330 SMM(I)=CMPLX(PINJ(I),-QINJ(I))-SINJ
340 SMMM=AMAX1(SMMM,CABS(SMM(I)))
        IF(IPRINT-1) 350,350,390
350 WRITE(LP,360) K,(VB(I),I=1,NB)
360 FORMAT(/19H ITERATION NUMBER =,I5/1X,18(1H-)/
110X,12HBUS VOLTAGES/(10X,10F12.5))
        WRITE(LP,370) (SMM(I),I=1,NB)
370 FORMAT(/10X,23HAPPARENT POWER MISMATCH/(10X,10F12.5))
        WRITE(LP,380) SMMM
380 FORMAT(/10X,31HMAXIMUM APPARENT POWER MISMATCH/10X,2F12.5)
390 IF(SMMM-EPS) 600,600,400
C
C     CALCULATE THE ELEMENTS OF THE JACCOBIAN IF IJAC=JJAC
400 IJAC=IJAC+1
    IF(JJAC-IJAC) 410,410,470
410 DO 440 I=1,NX
        II=INDEX(I)
        DO 430 J=1,NX
            JJ=INDEX(J)
            SL=VB(II)*CONJG(Y(II,JJ))
            A(I,J)=REAL(SL)
            A(I,J+NX)=AIMAG(SL)
            A(I+NX,J)=AIMAG(SL)
            A(I+NX,J+NX)=-REAL(SL)
            IF(I=J) 430,420,430
420 A(I,I)=A(I,I)+REAL(IB(II))
            A(I,I+NX)=A(I,I+NX)+AIMAG(IB(II))
            A(I+NX,I)=A(I+NX,I)-AIMAG(IB(II))
            A(I+NX,I+NX)=A(I+NX,I+NX)+REAL(IB(II))
430 CONTINUE
440 CONTINUE
        IJAC=0
        IF(IPRINT) 450,450,470
450 WRITE(LP,460)
460 FORMAT(1H1,9X,13HTHE JACCOBIAN/10X,13(1H-)/)

```



```

      CALL MAPRT(A,NXX,NXX,IX)
470 DO 480 I=1,NX
      II=INDEX(I)
      B(I)=REAL(SMM(II))
480 B(I+NX)=AIMAG(SMM(II))
C
C      SOLVE THE EQUATION A*DV=SMM
C
500 CALL DECON(A,NXX,IX,EPSU,ISING)
      IF(ISING) 510,530,510
510 JFAIL=1
      WRITE(LP,520)
520 FORMAT(26H THE JACCOBIAN IS SINGULAR)
      GO TO 990
530 CALL SOLVB(B,X,NXX,1,IX)
      DO 540 I=1,NX
      II=INDEX(I)
      DV(II)=CMPLX(X(I),X(I+NX))
540 VB(II)=VB(II)+DV(II)
      IF(IPRINT) 550,550,570
550 WRITE(LP,560) (DV(I),I=1,NB)
560 FORMAT(10X,19HVOLTAGE CORRECTIONS/(10X,10F12.5))
570 CONTINUE
      WRITE(LP,580) MAXIT
580 FORMAT(22H NO CONVERGENCE AFTER,15,11H ITERATIONS)
      JFAIL=-1
      GO TO 990
C
C      PRINT OUT THE RESULTS
C
600 DO 605 I=1,NB
      VBR(I)=REAL(VB(I))
605 VBI(I)=AIMAG(VB(I))
      IF(IPRINT=1) 610,610,690
610 WRITE(LP,620)
620 FORMAT(33H RESULT OF LOAD-FLOW CALCULATIONS/1X,32(1H=)/
      110H      BUS
      2,15H      REAL(VB(I))
      3,15H      IMAG(VB(I))
      4,15H      PINJ(I)
      5,15H      QINJ(I)
      6,15H      DELP(I)
      7,15H      DELQ(I)
      8)
      DO 630 I=1,NB
630 WRITE(LP,640) I,VBR(I),VBI(I),PINJ(I),QINJ(I),SMM(I)
640 FORMAT(110,6F15.5)
990 RETURN
      END

```

NEID*ONEIDLIB.MAPRT

APPENDIX E: MAPRI

EIDLIB.MAPRI

```
SUBROUTINE MAPRI(A,MA,NA,IA)
C
C SUBROUTINE TO PRINT OUT MATRICES ON LINE PRINTER
C
C AUTHOR, STORE LINDAHL 1971-05-02
C
C A(IA,*) MATRIX TO BE PRINTED
C MA ACTUAL NUMBER OF ROWS IN A
C NA ACTUAL NUMBER OF COLUMNS IN A
C IA DIMENSION PARAMETER FOR A
C
C SUBROUTINE REQUIRED
C NONE
C
C DIMENSION A(IA,1)
C
C IF(NA.LE.0.OR.MA.LE.0) GO TO 70
DO 60 JC=1,NA,5
JCA=JC
JCB=MIN(JC+4,NA)
WRITE(6,10) (J,J=JCA,JCB)
10 FORMAT(/10H COLUMN NR,10X,I3,4(17X,I3))
DO 60 I=1,MA
WRITE(6,30) I,(A(I,J),J=JCA,JCB)
30 FORMAT(7H ROW NR,I3,5(3X,G17.8))
IF(MOD(I,5).EQ.0) WRITE(6,40)
40 FORMAT(1X)
IF(MOD(I,50).EQ.0) WRITE(6,50)
50 FORMAT(1H1)
60 CONTINUE
RETURN
70 WRITE(6,80)
80 FORMAT(/33H CALL TO MAPRI WITH MA OR NA LE 0)
RETURN
END
```

5NEID*5NEIDLIB.CMAPRI

APPENDIX F: CMAPRI

EIDLIB.CMAPRI

SUBROUTINE CMAPRI(A,MA,NA,IA)

```
C
C   COMPLEX VERSION OF MAPRI
C   SUBROUTINE TO PRINT OUT MATRICES ON LINE PRINTER
C
C   AUTHOR( STURE LINDAHL 1971-09-21
C
C   A(IA,*)      MATRIX TO BE PRINTED
C   MA          ACTUAL NUMBER OF ROWS IN A
C   NA          ACTUAL NUMBER OF COLUMNS IN A
C   IA          DIMENSION PARAMETER FOR A
C
C   SUBROUTINE REQUIRED
C           NONE
C
C   COMPLEX A
C
C   DIMENSION A(IA,1)
C
C   IF(NA.LE.0.OR.MA.LE.0) GO TO 70
C   DO 60 JC=1,NA,5
C   JCA=JC
C   JCB=MIN(JC+4,NA)
C   WRITE(6,10) (J,J=JCA,JCB)
10  FORMAT(10H COLUMN NR,10X,13,4(21X,13))
C   DO 60 I=1,MA
C   WRITE(6,30) I,(A(I,J),J=JCA,JCB)
30  FORMAT(7H ROW NR,13,5(1X,2G11.6,1X))
C   IF(MOD(I,5).EQ.0) WRITE(6,40)
40  FORMAT(1X)
C   IF(MOD(I,50).EQ.0) WRITE(6,50)
50  FORMAT(1H1)
60  CONTINUE
C   RETURN
70  WRITE(6,80)
80  FORMAT(/33H CALL TO MAPRI WITH MA OR NA LE 0)
C   RETURN
C   END
```