



Analys och organisering av ö-drift för en samförbränningsstation vid Åmotfors Bruk

– En studie av ö-driftssimuleringar i DIgSILENT

Examensarbete inom Elteknik

ANDREAS ANDERSSON
CHRISTER OLSSON

Institutionen för energi och miljö
Elektrotekniska civilingenjörsprogrammet, 180p
Avdelningen för elteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2007

Analys och organisering av ö-drift för en samförbränningsstation vid Åmotfors Bruk

– En studie av ö-driftssimuleringar i DIgSILENT

ANDREAS ANDERSSON
CHRISTER OLSSON

Institutionen för energi och miljö
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2007

Analys och organisering av ö-drift för en samförbränningsstation vid Åmotfors Bruk

– En studie av ö-driftssimuleringar i DIGSILENT

ANDREAS ANDERSSON
CHRISTER OLSSON

© ANDREAS ANDERSSON, 2007.
CHRISTER OLSSON, 2007.

Institutionen för energi och miljö
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg
Sverige
Telefon 031-772 10 00

Omslagsbild:
3D-ritning av den planerade samförbränningsstationen vid Åmotfors Bruk [1].
Chalmers Reproservice
Göteborg, Sverige 2007

Sammanfattning

Åmotfors Bruk AB (ÅBAB) har idag en ineffektiv metod för generering av ånga till pappersproduktionen. Oförutsägbara energipriser samt modernisering av befintlig utrustning ligger bakom beslutet att installera en samförbränningsstation där bränslet i huvudsak består av hushållsavfall. Denna anläggning kommer dels att generera ånga till pappersproduktionen samt producera elektricitet via en ångturbin. I nuläget stoppas all försörjning av elektricitet till Åmotfors Bruk (ÅB) när bortkoppling sker från det externa nätet. Detta medför stopp i pappersproduktionen vilket orsakar stora ekonomiska förluster. Dessa stopp kan reduceras genom att samförbränningsstationen används till att försörja ett delsystem med drifter, s.k. ö-drift.

Uppgiften har varit att organisera vilka drifter som kan och skall spänningssättas i ö-drift på ett sådant sätt att generatoren klarar av att hålla frekvens och spänning inom rimliga gränser. För ÅBs del är dessa drifter mestadels pumpar och kompressorer som används vid färskvattensförsörjning och vid eventuell brand. Belysningen i pappersbruket har även prioriterats.

Vid manuell inkoppling till ö-drift bryts kopplingen mellan ö-nätet och resterande system via driftcentralen. En automatisk inkoppling sker när det externa nätet blir spänningslöst och brytaren slår ifrån per automatik. Vid manuell inkoppling kommer den önskade effekten att ligga på 2.76 MW medan när ö-nätet kopplas in automatiskt blir denna effekt 1.87 MW.

Resultaten för de båda fallen blev mycket tillfredställande och uppfyllde förväntningarna. Frekvensen stabiliserade sig inom 0.2 % av nominellt värde som mest medan spänningen alltid svängde in sig på 1 p.u. Enskilda värden under insvängningen uppmättes till över dessa gränser, dock låg extremvärdena inom rimliga gränser.

Nyckelord: ö-drift, pappersbruk, ö-nät, samförbränningsstation, reglersystem.

Abstract

Åmotfors Bruk AB (ÅBAB) has today an inefficient production of steam for the manufacturing of paper. Unpredictable energy prices and modernisation of the current equipment has been the underlying factors to invest in a thermal power plant, mainly driven by garbage. This facility will not only use the steam for paper production, it will also generate electricity through a steam turbine. Today, when a fault on the supplying line occurs which leads to disconnection of the external grid, all the support of electricity to Åmotfors Bruk (ÅB) will disappear. This will lead to major interruptions in the paper production, which will cause severe economical losses. If the power plant can be operated in island operation it would lead to a reduction of these interruptions.

The assignment has been to organize the different machines in the paper mill during island operation so that the generator can work in a desirable and optimal way. These machines are mainly pumps and compressors that are used for the support of freshwater and during potential fires. Lighting in the facilities has also been a priority during island operation.

To enter island operation manually the breaker between the system and the island will be opened by the operator. An automatic connection occurs when there is a failure in the external grid, the breaker will then open automatically. In the case of a manually connected island, the desired power production in the island will be 2.76 MW. If an automatic connection occurs, the desired power will be 1.87 MW.

The obtained results were very satisfactory in comparison with the expectations. The island frequency became stable at a deviation of around 0.2 % from its nominal value at worst, and the voltage always stabilized at 1 p.u. Some values during the oscillations were measured above these limitations, but the extreme values were at all times reasonable.

The report is written in Swedish.

Förord

Denna rapport är en del i ett examensarbete utfört på Elektrotekniska civilingenjörsprogrammet vid Chalmers Tekniska Högskola. Rapporten är skriven för konsultfirman WTC Teknik i Karlstad som leder projekteringen av samförbränningsstationen åt Wermland Paper AB i Åmotfors. Arbetet omfattar 20 poäng vardera för de båda författarna Andreas Andersson och Christer Olsson.

Vi vill härmed tacka våra handledare Torbjörn Thiringer (Chalmers) och Kurt Härdig (WTC Teknik) för deras hjälp och stöd under hela arbetet. Vi vill också ta tillfället i akt att tacka en rad andra personer som hjälp till med bra, nyttig och relevant information under arbetets gång:

Tuan A. Le, Chalmers

Jörgen Bergvall och Ola Bergman, ÅBAB

Richard Peres, Lars Engdahl, Lars Gertmar och Sven Bjelm, ABB AB

Set Persson, Vattenfall AB

Ett stort tack riktas till DIGSILENT GmbH för att vi har fått möjlighet att nyttja deras programvara utanför skolans område.

Slutligen vill vi tacka Peter Valaszcai för att han delgett oss av sina funderingar och erfarenheter under detta examensarbete.

Göteborg 2007-10-23

Andreas Andersson

Christer Olsson

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Tidigare arbeten	3
1.3	Syfte	3
1.4	Arbetsgång	4
1.5	Målgrupp	4
1.6	Förutsättningar och begränsningar	4
2	Teori	7
2.1	Ö-drift	7
2.2	Effektflöden	8
2.2.1	Admittansmatrisen	9
2.2.2	Ekvationer för beräkning av effektflöden	10
2.2.3	Beräkningsalgoritmer för effektflöden	11
2.2.4	Newton-Raphson-algoritmen	12
2.2.4.1	Newton-Raphson-algoritmen applicerad på effektflöden	13
2.3	Reglerstyrka	15
2.4	DIGSILENT	16
2.4.1	Funktioner	16
2.4.2	Implementering	16
2.4.3	Simulering och analysering av resultat	18
2.5	Elektriska maskiner	20
2.5.1	Asynkronmaskinen	20
2.5.2	Likströmsmaskinen	22
2.6	Synkrogeneratoren	23
2.7	Likriktare	24
2.8	Frekvensomriktare	25
2.9	Intelligenta ställverk	26
2.10	Reglersystem	26
2.11	Regleregenskaper	28
3	Åmotfors Bruk	29
3.1	Ritningar och bilder	29
3.2	Samförbränningsstationen	33
3.3	Komponentdata	35
3.3.1	Transformatorer	35
3.3.2	Kondensatorbatterier	36
3.3.3	Kablar	36
3.3.4	Mekaniska laster	37
4	Problemlösning	39

4.1	Antaganden	39
4.1.1	Motordata	39
4.1.2	Aggregering	40
4.1.2.1	Effekt	41
4.1.2.2	Impedanser	41
4.1.2.3	Tröghetsmoment	42
4.1.3	Generatoren	43
4.1.4	In- och urkoppling till ö-drift	43
4.2	Alternativ för belastningsförhållanden i ö-drift	44
4.2.1	Prioriterade laster	44
4.2.2	Ö-nätets utformning	46
4.2.2.1	Laster	47
4.2.2.2	Placering	49
4.3	Simulering av ö-drift utan reglering	51
4.3.1	Manuell inkoppling till 1.6 MW ö-nät	51
4.4	Reglersystem	54
4.5	Simulering med reglering av extremfall	58
4.5.1	Manuell inkoppling till 3.0 MW ö-nät	58
4.5.2	Manuell inkoppling till 1.6 MW ö-nät	60
4.5.3	Automatisk inkoppling till 2.5 MW ö-nät	62
4.5.4	Automatisk inkoppling till 1.6 MW ö-nät	65
4.6	Simulering av föreslagen ö-nätskonfiguration	68
4.6.1	Manuell inkoppling till 2.76 MW ö-nät	68
4.6.2	Automatisk inkoppling till 1.87 MW ö-nät	70
5	Slutsatser och diskussion	75
6	Referenser	79
Bilaga 1 – Mailkonversation		I
Bilaga 2 – Motorer		III

Nomenklatur

I	Ström	Ampere
U_f	Fasspänning	Volt
U	Huvudspänning	Volt
Y	Admittans	Siemens
S	Skenbar effekt	MegaVoltAmpere
P	Aktiv effekt	MegaWatt
Q	Reaktiv effekt	MegaVoltAmpere reaktiv
ψ	Överföringsvinkel	Rad
λ	Impedansvinkel	Rad
P_m	Mekanisk effekt	MegaWatt
J	Tröghetsmoment	Kgm ²
ω_r	Mekanisk vinkelhastighet	Rad/s
θ	Vinkel för roterande objekt	Rad
H	Tröghetskonstant	Sekunder
ω_0	Systemfrekvens	Rad/s
S_b	Effektbas	MegaVoltAmpere
T_e	Elektriskt moment	Newtonmeter
K	Förstärkning	-
$L_{s\lambda}$	Läckinduktans i statorn	Henry
$L_{r\lambda}$	Läckinduktans i rotorn	Henry
p	Poltal	-
T_m	Mekaniskt moment	Newtonmeter
L_m	Magnetiseringsinduktans	Henry
R_s	Statorresistans	Ohm
R_r	Rotorresistans	Ohm
s	Eftersläpning	-
n_s	Synkront varvtal	Varv per minut
n_m	Mekaniskt varvtal	Varv per minut
R_a	Ankarresistans	Ohm
R_f	Fältresistans	Ohm
L_a	Läckinduktans i ankarkrets	Henry
L_f	Läckinduktans i fältkrets	Henry
E_a	Inducerad spänning	Volt
C	Kapacitans	Farad
ΔY	Styrsignal	-

1 Inledning

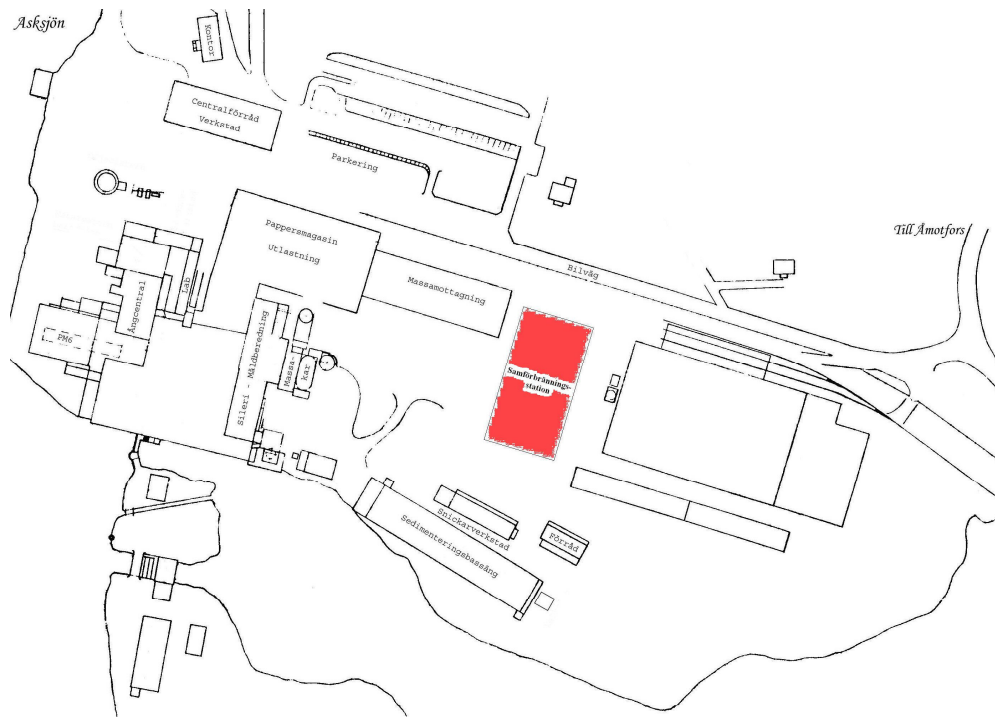
Detta kapitel introducerar läsaren till rapportens bakgrund, syfte och målgrupp. Här kommer även förutsättningar och begränsningar att behandlas.

1.1 Bakgrund

Åmotfors Bruk AB (ÅBAB) ingår i koncernen Wermland Paper AB (WPAB) tillsammans med Bäckhammars Bruk AB (BBAB). ÅBAB producerar oblekta och blekta specialkraftpapperskvaliteter så som stålmellanläggspapper, högabsorberbent papper och elektrotekniska papper till en årsproduktion av 55000 ton [I2].

Åmotfors Bruk (ÅB) har idag en ineffektiv metod för generering av ånga till pappersproduktionen. Denna metod utgörs av två oljeeldade pannor från mitten av 1960-talet och en elektriskt driven panna från 1984. Sammanlagt kan dessa producera ånga till en effekt av 26 MW, som med råge överstiger ÅBs behov som är ca 16 MW.

Oförutsägbara energipriser samt modernisering av befintlig utrustning ligger bakom beslutet att installera en samförbränningsstation där bränslet i huvudsak består av hushållsavfall. Denna anläggning kommer dels att generera ånga till pappersproduktionen samt producera elektricitet via en ångturbin. Det kommer även att finnas en befintlig del ånga som används till att försörja delar av Åmotfors tätort med fjärrvärme [I3]. I Figur 1 visas en översiktskarta över ÅB samt den tilltänkta samförbränningsstationens placering. En annan bild över området kan ses i Figur 2, där ett flygfoto över ÅB med en modell av den nya samförbränningsstationen presenteras.



Figur 1. Översiktskarta över fabriksområdet med den nya samförbränningsstationen (rödmarkerad) inritad.



Figur 2. Flygfoto över AB med inritad modell av den nya samförbränningsstationen markerad med röd pil [11].

1.2 Tidigare arbeten

Ämnet ö-drift har behandlats i en del olika publikationer innan denna. De flesta är skrivna på engelska men det finns även ett fåtal publikationer på svenska. Skrifter om ämnet ö-drift specialiserar sig oftast på metoder för att reglera variabler som ändras när systemet går in och ur ö-drift. Ett svenskt exempel på detta är examensarbetet ”Trimningsmetod för frekvensregulatorer i ödrift” av Magnus Åkesson [I4]. I denna publikation tar författaren fram en metod för hur man kan trimma kraftverkens frekvensregulatorer för ö-drift. Han analyserar de speciella förhållandena som uppstår och tar upp hur de olika reglerparametrarna skall trimmas för att klara av ö-drift.

Statens energimyndighet har givit ut två skrifter där ö-drift behandlas, ”Fjärrvärme vid ö-drift” [I5] och ”Erfarenheter efter Gudrun” [I6]. Där är det den förstnämnda som tar upp mest om ö-drift. Här handlar det om hur elektrisk ö-drift kan nyttjas i samband med fjärrvärme och på detta sätt kunna lösa problem vid omfattande och långvariga elavbrott.

I databasen IEEE Xplore finner man vid en första anblick 70 artiklar som tar upp ämnet ö-drift. En av dem är ”Temporary islanded operation of dispersed generation on distribution networks” av R. Caldon, F. Rossetto och R. Turri [A1]. Denna artikel behandlar lämpligheten för att köra ett system i ö-drift rent generellt. Författarna i artikeln diskuterar och analyserar vilka kritiska moment som kan uppträda vid in- och urkoppling av ö-drift. De använder sig av flera generatorer i ett ö-nät när de simulerar och detta är den stora skillnaden från denna rapport. Två finska författare, J. Jyrinsalo och E. Lakervi, har skrivit artikeln ”Planning the islanding scheme of a regional power producer” som även den finns i databasen IEEE Xplore [A2]. Artikeln tar upp metoder för att bestämma vilket område ö-drift skall ske i och hur spänningen kan kontrolleras i detta område. Påträffandet av fel under ö-drift samt frekvenskontroll är två andra områden som artikeln behandlar.

1.3 Syfte

I nuläget stoppas all försörjning av elektricitet till ÅB när bortkoppling sker ifrån det externa nätet. Denna typ av bortkoppling kan orsakas av t.ex. höga spänningar och strömmar som uppträder i nätet vid blixtnedslag. Detta medför stopp i pappersproduktionen vilket orsakar stora ekonomiska förluster. Dessa kan reduceras

genom att nyttja samförbränningsstationen i ö-drift, vilket skulle leda till förkortade uppstartningstider. Utifrån detta har följande frågeställningar identifierats:

- Vilka enheter kan och bör försörjas vid rätt belastning i ö-drift?
- Hur kommer olika belastningsfall att påverka pappersbruket i ö-drift?
- Hur bör mellanspänningsställverket byggas om för att kunna arbeta i ö-drift?
- Klarar systemet av att gå över i ö-drift utan alltför stora avvikelser i spänning och frekvens? Om inte, vilka justeringar behöver göras? Kan reglersystemet förbättras?

1.4 Arbetsgång

Tillvägagångssättet för detta examensarbete lyder enligt följande:

- 1) Få en överskådlig blick över driften i dagsläget.
- 2) Prioritera vilka laster som bör försörjas under ö-drift.
- 3) Simulera in- och urkoppling i ö-drift.
- 4) Studera viktiga parametrar så som frekvens och spänning.
- 5) Konstruera och implementera ett reglersystem vars uppgift är att reglera spänning och frekvens inom rimliga gränser.

1.5 Målgrupp

Denna rapport riktar sig i första hand till företag inom processindustrin med delvis egen elförsörjning. Även systemoperatörer inom elsystem, vars intressen ligger i att utforska de möjligheter som skapas med ö-drift, kan finna denna rapport informativ. Slutligen vänder sig denna rapport även till den allmänt elkraftsintresserade läsaren.

1.6 Förutsättningar och begränsningar

Författarna av denna rapport har studerat fyra år på institutionen för elektroteknik vid Chalmers Tekniska Högskola. Det sista året läste de inriktningen Electric Power Engineering med bl.a. kurser inom elsystem och elektriska maskiner.

Då arbetet sker via ett pappersbruk med anor från 1897 är förutsättningarna att få tillgång till viss information begränsad. Detta kan t.ex. vara information om motordata eller transformatordata. Antaganden har därför varit nödvändiga i denna rapport. De viktigaste antagandena som har gjorts är motordata hos asynkronmotorerna som drivs i

pappersbruket. Dessa data har tagits fram med hjälp av jämförelse mellan olika referenser.

Specifikationer för samförbränningsstationens generator finns heller inte att tillgå då denna inte har blivit upphandlad ännu. Informationen som finns är att den skall ha en aktiv effekt på ca 2.6 MW med tillhörande effektfaktor $\cos\phi$ runt 0.92 . Parametrar för generatören kommer att tas fram genom kontakt med tillverkare och andra tillförlitliga referenser. Den tilltänkta generatören kommer troligtvis att ha ett avancerat reglersystem som i denna rapport kommer att representeras av ett mer trivialt reglersystem.

Samförbränningsstationen beräknas att vara i drift första/andra kvartalet 2009 vilket medför att slutsatserna i denna rapport enbart kommer att vara byggda på rent teoretiska simuleringar.

2 Teori

I detta kapitel kommer läsaren att introduceras för viktig bakomliggande teori som tillämpas i detta examensarbete.

2.1 Ö-drift

Svenska Kraftnät (SVK) definierar ö-drift enligt följande:

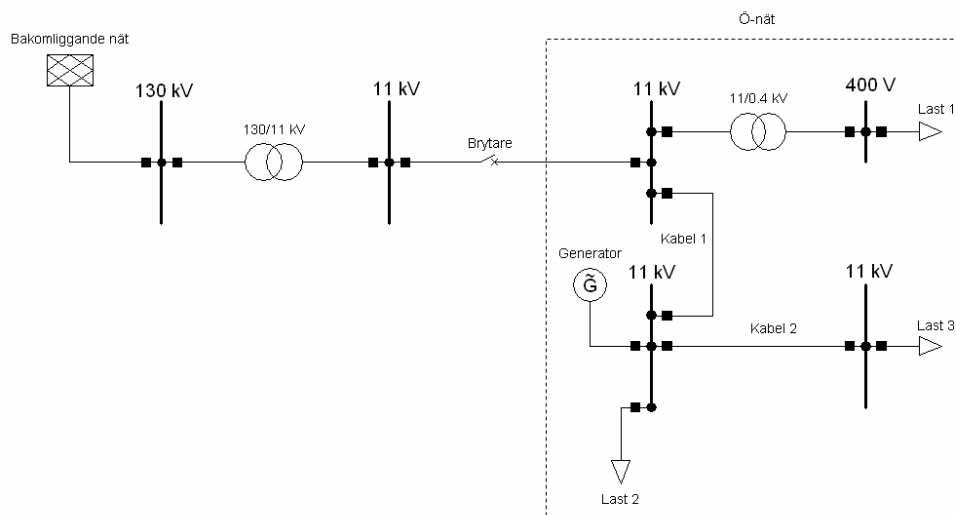
”Drift av produktionsanläggningar, stationer och ledningsnät i delsystem för att försörja ett område eller en verksamhet med elkraft.” [I7]

De nordiska länderna Sverige, Finland, Norge och en bit av Danmark (Själland) har gemensam elförsörjning genom elnätet Nordel. Detta nät består av många mindre regionnät som är sammankopplade genom ett större stamnät på 400 kV. Vid eventuella fel på stamnätet kopplas regionnäten bort och har då möjlighet att bli självförsörjande ”öar”, regionnäten skulle då sägas arbeta i s.k. ö-drift [I8]. Figur 3 demonstrerar hur ett ö-nät kan skapas med hjälp av en brytare. Under ö-drift är det ett fåtal generatorer som försörjer regionnätet istället för det stora stamnätet. Denna typ av drift är mycket användbar vid krissituationer som t.ex. krig, sabotage och andra större störningar som påverkar stamnätet. Ö-drift kan även opereras inom det lokala regionnätet då detta kan bestå av kunder som är känsliga för långa avbrott. Vissa extremt känsliga kunder så som processindustrier kan ha egen elproduktion och på så sätt gå in i ö-drift med hela anläggningen även vid andra tillfällen, t.ex. vid stora åskväder.

I ett stort kraftsystem som Nordel påverkar inte balansen mellan konsumerad och producerad effekt frekvensen på samma sätt som den gör i ö-drift. Detta innebär att frekvensregleringen är en mycket viktig del i konstruktionen av ett ö-nät. Ett dåligt frekvensreglerat system som går in i ö-drift kan behöva kopplas bort helt p.g.a. att frekvensen avviker för mycket från den nominella. Andra viktiga egenskaper som måste ses över när man konstruerar ett system för ö-drift är belastningsförhållanden och turbinernas regleregenskaper [I9]. I ö-nät som enbart innehåller en produktionsanläggning kommer belastningsförhållandet att ha en mycket större betydelse än för ett system med fler anläggningar, då dessa får ett större sammanlagt tröghetsmoment.

Kortslutningseffekten är även den beroende av hur många produktionsanläggningar som finns. Då denna effekt blir lägre för system i ö-drift kommer detta att medföra lägre felströmmar i systemet. Selektiviteten kommer då att ändras och vissa skydd kan komma att lösa ut felaktigt. Produktionsanläggningar som används i ö-drift måste även ses över för att vara förberedda på att kunna starta upp utan hjälp från ett yttre nät. Diesellaggregat och/eller batterier kan vara användbara för detta ändamål.

I Sverige är det SVK som har till uppgift att planera och utföra in- och urkoppling av olika områden i ö-drift när en krissituation inträffar. Vid normala förhållanden är det SVK eller de företag som äger produktionsanläggningar som står för in- och urkopplingen [I10].



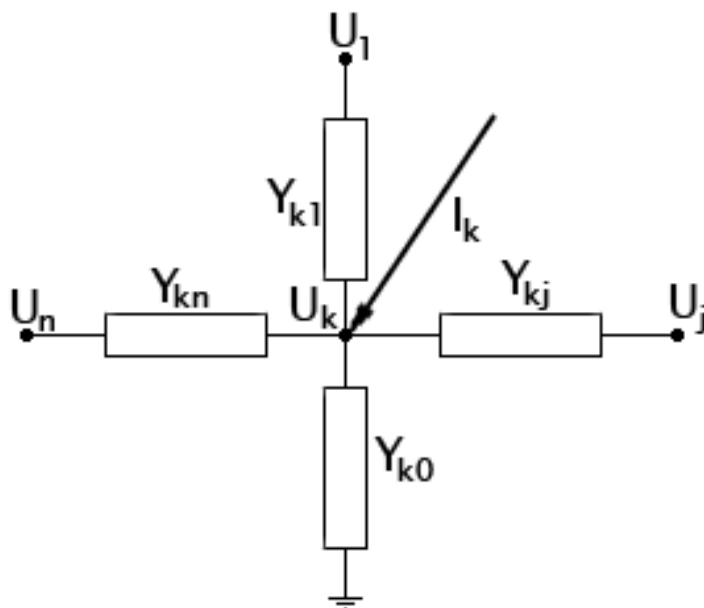
Figur 3. Ett exempel på hur ett ö-nät kan bildas.

2.2 Effektfloeden

I de flesta programvaror som används för simulering av elsystem är beräkningar av effektfloeden av stor betydelse. För att beräkna effektfloeden i ett system krävs det information om spänningar, impedanser etc. Härledningar av ekvationer och algoritmer i hela Kapitel 2.2 är inspirerade från [B1].

2.2.1 Admittansmatrisen

Vid beräkningar av effektlöden i elsystem är admittansmatrisen ett värdefullt verktyg. Denna matris innehåller information om de admittanser som finns mellan noder i systemet. I Figur 4 presenteras ett förenklat system med n stycken noder.



Figur 4. System med n noder.

Enligt Kirchhoffs strömlag är summan av alla de strömmar som flyter in och ut från en nod lika med noll. Strömmen som flyter in i nod k som funktion av spänningarna vid de olika noderna är:

$$I_k = U_k Y_{k0} + (U_k - U_1) Y_{k1} + \dots + (U_k - U_j) Y_{kj} + \dots + (U_k - U_n) Y_{kn}. \quad (1)$$

Detta kan även formuleras som:

$$I_k = U_k Y_{k0} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_k Y_{kj} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_j Y_{kj}. \quad (2)$$

Här har fallet då $j = k$ inte definierats. Denna admittans definieras som summan av alla admittanser kopplade till nod k , d.v.s.:

$$Y_{kk} = Y_{k0} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n Y_{kj} . \quad (3)$$

Vidare definieras den negativa admittansen mellan nod k och nod j som $-Y_{kj} = y_{kj}$ och (2) kan skrivas som:

$$I_k = U_k Y_{kk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_j y_{kj} . \quad (4)$$

Vilket slutligen leder till:

$$I_k = \sum_{j=1}^n U_j y_{kj} . \quad (5)$$

På samma sätt kan uttryck för alla strömmar I_k , där $k=1 \dots n$, tecknas och det erhålls en $n \times n$ -matris som beskriver den relation som gäller för strömmar och spänningar mellan systemets alla noder.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \cdot \\ I_k \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdot & Y_{1k} & \cdot & Y_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{k1} & \cdot & Y_{kk} & \cdot & Y_{kn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & \cdot & Y_{nk} & \cdot & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \cdot \\ U_k \\ \cdot \\ U_n \end{bmatrix} . \quad (6)$$

2.2.2 Ekvationer för beräkning av effektlöden

Återigen observeras ett system med n stycken noder. Den komplexa skenbara effekten kan skrivas som:

$$S = UI^* = P + jQ . \quad (7)$$

För bekvämlighetens skull i framtida beräkningar noteras även att:

$$S^* = U^* I = P - jQ . \quad (8)$$

Återigen betraktas nod k i systemet. Den konjugerade skenbara effekten som flyter in i nod k är:

$$S_k^* = U_k^* I_k = \{\text{ekvation (5)}\} = U_k^* \sum_{j=1}^n U_j \mathcal{Y}_{kj} = \sum_{j=1}^n \mathcal{Y}_{kj} U_j U_k^*. \quad (9)$$

De tre komplexa kvantiteterna $\mathcal{Y}_{kj}$, U_j och U_k kan uttryckas som:

$$\mathcal{Y}_{kj} = |\mathcal{Y}_{kj}| e^{j\lambda_{kj}}, \quad U_j = |U_j| e^{j\psi_j}, \quad U_k = |U_k| e^{j\psi_k}.$$

Ekvation (9) kan då skrivas om som:

$$S_k^* = \sum_{j=1}^n \mathcal{Y}_{kj} U_j U_k^* = \sum_{j=1}^n |U_k| |U_j| |\mathcal{Y}_{kj}| e^{-j(\psi_k - \psi_j - \lambda_{kj})}. \quad (10)$$

Den aktiva respektive reaktiva effekten fås genom att ta real- respektive imaginärdelen av S_k :

$$P_k = \text{Re}\{S_k\} = \text{Re}\{S_k^*\} = \sum_{j=1}^n |U_k| |U_j| |\mathcal{Y}_{kj}| \cos(\psi_{kj} - \lambda_{kj}), \quad (11)$$

$$Q_k = \text{Im}\{S_k\} = -\text{Im}\{S_k^*\} = \sum_{j=1}^n |U_k| |U_j| |\mathcal{Y}_{kj}| \sin(\psi_{kj} - \lambda_{kj}). \quad (12)$$

2.2.3 Beräkningsalgoritmer för effektlöden

De uttryck som tagits fram för effektlöden är icke-linjära differentialekvationer och innehåller fyra obekanta parametrar. (Här är det antaget att data för ledningarna är kända och således är admittanselementet känt.) Ickelinjära differentialekvationer måste lösas numeriskt med hjälp av iterativa metoder.

Vid varje skena som studeras i systemet är två av fyra parametrarna kända och betraktas som inmatningsdata. De två okända parametrarna ses som utdata erhållna från lösningen av effektlödena. Det finns tre olika typer av skenor sett ur detta perspektiv som redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Olika typer av skenor.

Typ av skena	Kända parametrar
Spänningskontrollerad skena	$ U_k , P_k$
Belastningsskena	P_k, Q_k
Referensskena	$ U_{ref} , \psi_{ref}$

Det finns olika algoritmer att välja mellan när man ska lösa dessa ekvationer, vilka i sin tur har olika egenskaper. Vanligast är dock det faktum att en enkel algoritm konvergerar långsamt, medan en komplex algoritm konvergerar desto snabbare.

2.2.4 Newton-Raphson-algoritmen

En vanligt förekommande algoritm som används för effektlöden (t.ex. i mjukvaran PowerWorld och mjukvaran förekommande i detta examensarbete, DIGSILENT) är den metod I. Newton och J. Raphson tagit fram. Metoden bygger på att finna rötterna till ekvationen $f(x) = 0$ genom att först gissa en rot, $x^{(o)}$. Antag att detta genererar ett fel, $\Delta x^{(o)}$, från det korrekta värdet. Lösningen kan således skrivas som $f(x^{(o)} + \Delta x^{(o)}) = 0$. Taylorutvecklingen av funktionen kring $x^{(o)}$ kan skrivas som:

$$f(x^{(o)} + \Delta x^{(o)}) = f(x^{(o)}) + \Delta x^{(o)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x^{(o)}} + \frac{1}{2} (\Delta x^{(o)})^2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)_{x^{(o)}} + \dots \quad (13)$$

Taylorutvecklingen innehåller oändligt många termer. De första polynomen i utvecklingen är de som oftast används, de resterande termerna kallas därefter för resttermer. Här begränsas den till två termer då felet anses vara litet och högerledet i (13) blir då:

$$f(x^{(o)} + \Delta x^{(o)}) = f(x^{(o)}) + \Delta x^{(o)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x^{(o)}} = 0. \quad (14)$$

På så sätt har en estimering av felet $\Delta x^{(o)}$ erhållits:

$$\Delta x^{(o)} = -\frac{f(x^{(o)})}{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^{(o)}}} \quad (15)$$

Vidare implementeras denna estimering av felet i den första approximationen:

$$x^{(1)} = x^{(o)} + \Delta x^{(o)} = x^{(o)} - \frac{f(x^{(o)})}{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^{(o)}}}. \quad (16)$$

$x^{(1)}$ används vidare som ny approximation och nästa steg blir då:

$$x^{(2)} = x^{(1)} + \Delta x^{(1)} = x^{(1)} - \frac{f(x^{(1)})}{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^{(1)}}}. \quad (17)$$

Den generella algoritmen blir således:

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} + \Delta x^{(p)} = x^{(p)} - \frac{f(x^{(p)})}{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^{(p)}}}. \quad (18)$$

Denna process fortlöper tills $|x^{(p+1)} - x^{(p)}| < \varepsilon$, där ε (noggrannheten) bestäms av vad för grad av känslighet som krävs i lösningen.

2.2.4.1 Newton-Raphson-algoritmen applicerad på effektlöden

Nu kan denna algoritm tillämpas på de effektlödesekvationer som härletts i Kapitel 2.2.2.

Dessa löd:

$$P_k = \sum_{j=1}^n |U_k| |U_j| |y_{kj}| \cos(\psi_k - \psi_j - \lambda_{kj}), \quad (19)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^n |U_k| |U_j| |y_{kj}| \sin(\psi_k - \psi_j - \lambda_{kj}). \quad (20)$$

Här är det således överföringsvinkeln ψ_j och spänningen U_j som skall estimeras. En första gissning blir då $\psi_j^0 + \Delta\psi_j^0$ och $|U_j|^0 + \Delta|U_j|^0$. De estimeringar som gjorts för beräkning av effektlödena skrivs fortsättningsvis som:

$$f_{pk} = f_{pk}(\psi_j^0 + \Delta\psi_j^0; |U_j|^0 + \Delta|U_j|^0), \quad (21)$$

$$f_{qk} = f_{qk}(\psi_j^0 + \Delta\psi_j^0; |U_j|^0 + \Delta|U_j|^0). \quad (22)$$

Taylorutvecklingen av dessa funktioner blir:

$$f_{pk} = f_{pk}(\psi_j^0; |U_j|^0) + \dots + \left(\frac{\partial f_{pk}}{\partial \psi_j} \right)^0 \Delta\psi_j + \dots + \left(\frac{\partial f_{pk}}{\partial |U_j|} \right)^0 \Delta|U_j|^0, \quad (23)$$

$$f_{qk} = f_{qk}(\psi_j^0; |U_j|^0) + \dots + \left(\frac{\partial f_{qk}}{\partial \psi_j} \right)^0 \Delta\psi_j + \dots + \left(\frac{\partial f_{qk}}{\partial |U_j|} \right)^0 \Delta|U_j|^0. \quad (24)$$

Antag att P_k och Q_k är kända, då representeras den första estimeringen av P_k och Q_k av den första termen i f_{pk} och f_{qk} från (23) - (24). Det fel som erhålls mellan de riktiga och estimerade värdena blir således:

$$\Delta P_k^0 = P_k - f_{pk}(\psi_j^0; |U_j|^0), \quad (25)$$

$$\Delta Q_k^0 = Q_k - f_{qk}(\psi_j^0; |U_j|^0). \quad (26)$$

Dessa kan skrivas om som:

$$\Delta P_k^0 = \dots + \left(\frac{\partial f_{pk}}{\partial \psi_j} \right)^0 \Delta\psi_j^0 + \dots + \left(\frac{\partial f_{pk}}{\partial |U_j|} \right)^0 |U_j|^0 + \dots \quad (27)$$

$$\Delta Q_k^0 = \dots + \left(\frac{\partial f_{qk}}{\partial \psi_j} \right)^0 \Delta\psi_j^0 + \dots + \left(\frac{\partial f_{qk}}{\partial |U_j|} \right)^0 |U_j|^0 + \dots \quad (28)$$

Slutligen erhålls (27) - (28) i matrisform för n stycken samlingsskenor:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^0 \\ \cdot \\ \Delta P_n^0 \\ \Delta Q_1^0 \\ \cdot \\ \Delta Q_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial \psi_1} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial \psi_n} \right)^0 & \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial |U_1|} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial |U_n|} \right)^0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial \psi_1} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial \psi_n} \right)^0 & \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial |U_1|} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{p1}}{\partial |U_n|} \right)^0 \\ \left(\frac{\partial f_{q1}}{\partial \psi_1} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{q1}}{\partial \psi_n} \right)^0 & \left(\frac{\partial f_{q1}}{\partial |U_1|} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{q1}}{\partial |U_n|} \right)^0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \left(\frac{\partial f_{qn}}{\partial \psi_1} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{qn}}{\partial \psi_n} \right)^0 & \left(\frac{\partial f_{qn}}{\partial |U_1|} \right)^0 & \cdot & \left(\frac{\partial f_{qn}}{\partial |U_n|} \right)^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi_1^0 \\ \cdot \\ \Delta \psi_n^0 \\ \Delta |U_1|^0 \\ \cdot \\ \Delta |U_n|^0 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Resultatet från (29) baseras dock på den första gissningen som görs. Detta implementeras alltså vidare (se (16)) och itereringen fortsätter tills noggrannheten konvergerat tillräckligt nära noll. I matrisnotation kan detta skrivas som:

$$\Delta \mathbf{U}^v = \mathbf{J} \Delta \mathbf{X}^v. \quad (30)$$

Här står $\Delta \mathbf{U}$ för felberäkningarna i P och Q , $\Delta \mathbf{X}$ för felräkningarna i ψ och $|U|$, och slutligen kallas $\mathbf{J}$ för Jacobi's matris [B1].

2.3 Reglerstyrka

Ett elsystem som på något sätt förlorar produktion eller får ökad/minskad last kommer att få en obalans mellan producerad och förbrukad effekt. Detta leder till en förändring i frekvensen, antingen en ökning eller minskning beroende på effektbalansen. Om den förbrukade effekten är större än den producerade effekten kommer frekvensen att sjunka i systemet. Den mekaniska effekten måste då ökas genom att t.ex. kraftverken släpper på mer ånga/vatten till turbinen eller att det sker en omkoppling av lasterna. Den mekaniska effekten kommer då att vara större än den elektriska effekten vilket medför en ökning av frekvensen. Efter ett tag kommer frekvensen att stabilisera sig men avvika med en faktor Δf från den nominella frekvensen. Faktorn Δf bestäms av förhållandet:

$$\Delta f = \frac{-\Delta P}{R_{tot}}. \quad (31)$$

ΔP är skillnaden mellan förbrukad effekt och producerad effekt och R_{tot} är den sammanlagda reglerstyrkan i systemet. Reglerstyrkan, R , anger hur systemet svarar vid en förändring i aktiv effekt och uttrycks i MW/Hz [I8]. I Norden är det ett krav på att det skall finnas en total installerad reglerstyrka på $R = 6000$ MW/Hz, vilket skulle betyda att en reserv på 600 MW är nödvändig om frekvensen skall kunna ändras med 0.1 Hz [I11].

2.4 DIgSILENT

DIgSILENT är ett datorprogram för implementering av elsystem inom transmission, distribution och generation. Det är framtaget av DIgSILENT GmbH som är lokaliserat i Gomaringen, Tyskland. Australien, Sydafrika och Italien är andra länder där de har etablerat sin verksamhet och DIgSILENT används för närvarande i mer än 100 länder världen över [I12].

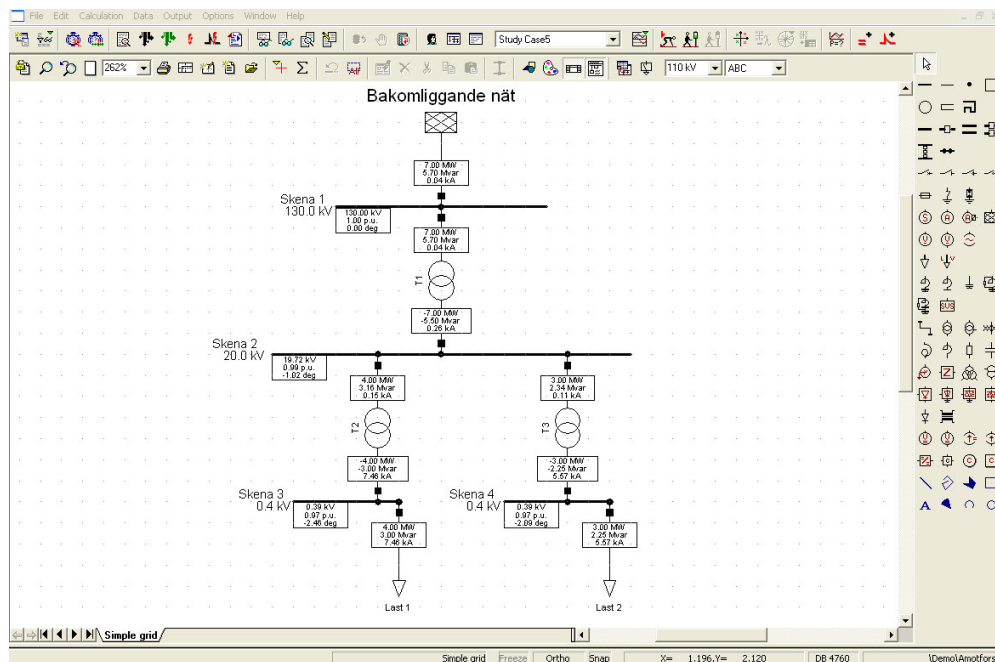
2.4.1 Funktioner

Användaren har en hel del funktioner att välja mellan i DIgSILENT. Några av de kvantiteter som kan beräknas för ett elsystem är:

- Effektflöden
- Felströmmar
- Stabilitet
- Övertoner
- Skydd

2.4.2 Implementering

DIgSILENT använder sig av ett grafiskt typsnitt när elsystem skall implementeras. Skenor används i grunden för att bygga upp systemet, därefter utgår man ifrån dessa skenor och placerar in komponenter så som kablar, laster och transformatorer. I Figur 5 illustreras DIgSILENTs huvudfönster där ett mindre system har byggts upp.



Figur 5. Huvudfönstret i DIgSILENT med ett mindre system inritat.

Huvudfönstret består av en rityta och flera fält med ikoner där komponenter och olika typer av analyser kan väljas. Om ritytan observeras närmare ses det uppbyggda systemet samt de rutor som sitter vid varje komponent. Dessa rutor visar olika variabler så som spänning, ström och aktiv effekt. I huvudfönstret kan data för varje enskild komponent redigeras. Detta åskådliggörs i Figur 6 där användaren kan ändra olika parametrar för en transformator. Det finns även en hel del flikar i detta fönster, dessa representerar en del av de olika kvantiteter som kan beräknas.

2-Winding Transformer Type - Library\Transformator 1.TypTr2

RMS-Simulation	EMT-Simulation	Harmonics	Optimization	State Estimator	Reliability	Description
Basic Data	Load Flow	VDE/IEC Short-Circuit	Full Short-Circuit	ANSI Short-Circuit		

Name:

Technology:

Rated Power: MVA

Nominal Frequency: Hz

Rated Voltage

HV-Side: kV

LV-Side: kV

Positive Sequence Impedance

Short-Circuit Voltage uk: %

Copper Losses: kW

Zero Sequ. Impedance, Short-Circuit Voltage

Absolute uk0: %

Resistive Part ukr0: %

Vector Group

HV-Side:

LV-Side:

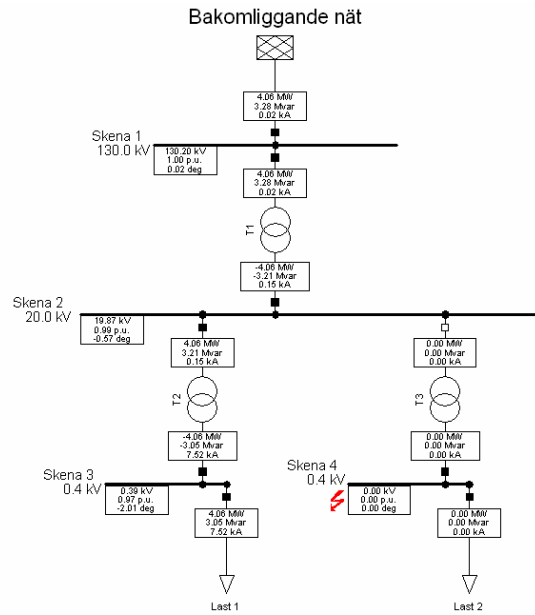
Phase Shift: *30deg

Name: Dyn0

Figur 6. Redigeringsfönster för en transformator i DIgSILENT.

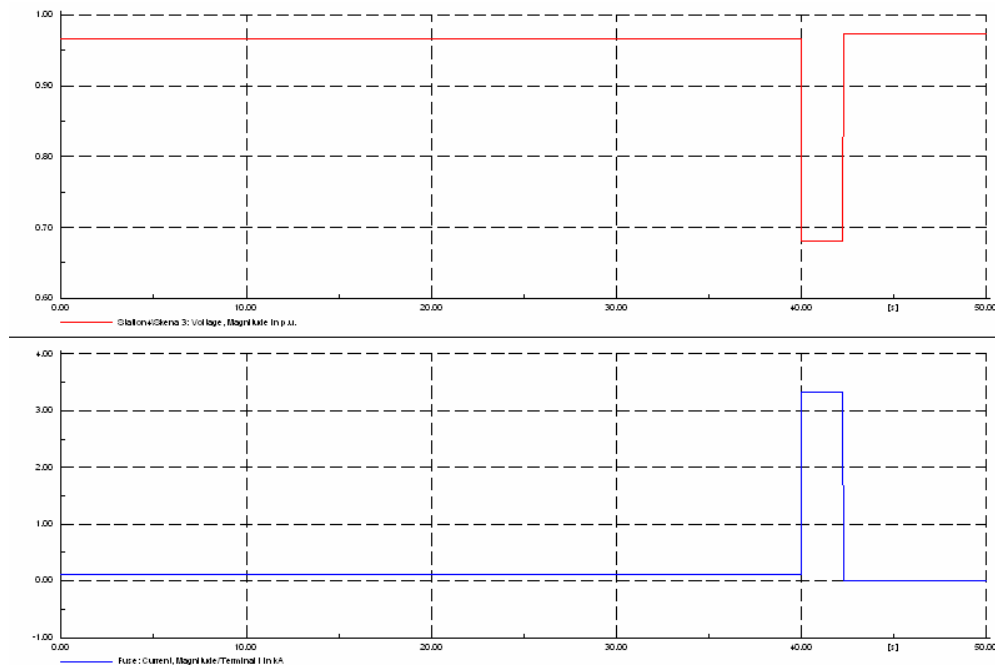
2.4.3 Simulering och analysering av resultat

DIgSILENT ger även användaren möjligheten att simulera olika typer av fall som kan inträffa i systemet, t.ex. att ett fel inträffar på en skena, en komponent i systemet fallerar eller konfiguration av selektivitetsordning. I Figur 7 ser vi ett mindre elsystem där det inträffat ett fel på skena 4 och till följd av detta har säkringen på högspänningssidan (HSP) av transformatorn löst ut. Användaren bestämmer själv när och var felet skall inträffa i systemet och det finns möjlighet att bestämma simuleringstiden.



Figur 7. Ett mindre elsystem uppritat i DigSILENT med ett fel på skena 4.

Då ett fel på skena 4 i detta exempel kommer att ge upphov till en spänningsreducering på skena 2 och 3, kan det vara intressant att titta närmare på detta. DigSILENT erbjuder användaren att lägga in de simuleringsdata som erhållits i olika grafer och på så sätt kunna analysera simuleringen ännu djupare. Figur 8 visar spänningen (röd graf) på skena 3 uttryckt i per unit (p.u.) och strömmen som går genom transformatorn hänvisat till HSP uttryckt i kA (blå graf).



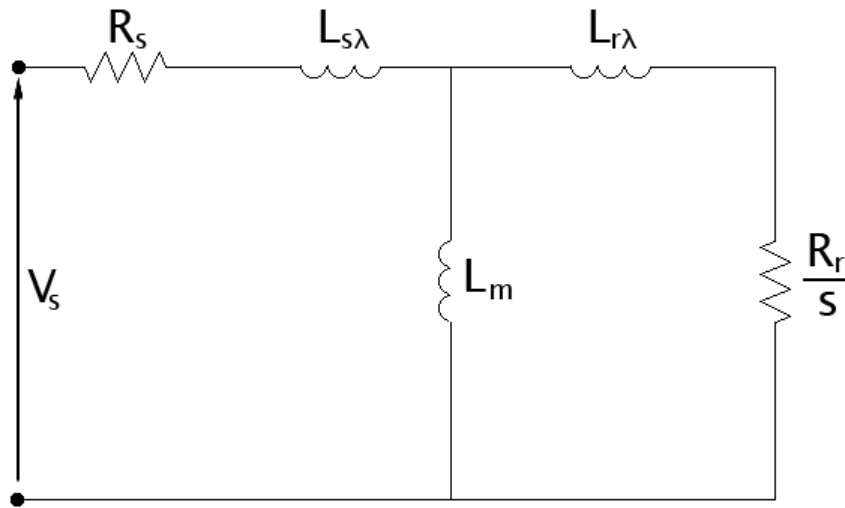
Figur 8. Spänningen vid skena 3 samt den ström som går genom transformator T3 hänvisat till HSP.

2.5 Elektriska maskiner

Vid transienta förlopp förekommande i elsystem är elektriska maskiners dynamiska egenskaper av stort intresse. I kapitlen 2.5.1 och 2.5.2 beskrivs asynkronmaskinen och likströmsmaskinen i detalj.

2.5.1 Asynkronmaskinen

Den vanligaste lasten i elsystem är motorer som står för ca 60-70 % av den förbrukade effekten. Av dessa 60-70 % är merparten asynkronmaskiner [B2]. Detta är även fallet i ÅB där det finns ca 140 asynkronmaskiner och ca 30 likströmsmaskiner. Det ekvivalenta schemat för en asynkronmaskin ser ut enligt Figur 9.



Figur 9. Det ekvivalenta schemat för en asynkronmotor i stationärt tillstånd.

R_s och R_r står för resistiva förluster i stator respektive rotor. Asynkronmaskinens läckinduktanser symboliseras i figuren av $L_{s\lambda}$ och $L_{r\lambda}$. Magnetiseringsinduktansen, d.v.s. den induktans som symboliserar den magnetiseringsström som behövs för att skapa ett magnetiskt flöde mellan stator och rotor, ligger parallellt med de andra impedanserna och betecknas med L_m . Eftersläpningen s är kvoten mellan det synkrona varvtalet och det mekaniska varvtalet enligt:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s}. \quad (32)$$

Vid tomgång snurrar asynkronmaskinen nästintill med det synkrona varvtalet och eftersläpningen s blir således väldigt liten, medan då kvoten R_r/s från Figur 9 blir väldigt stor. I detta fall flyter endast en liten ström i rotorn och därav produceras det enbart ett litet vridmoment på maskinaxeln. När motorn driver en last ändras motorns drivmoment och eftersläpningen ökar. Kvoten R_r/s minskar i detta fall och det krävs en större ström från statorn överförd till rotorn för att klara av att driva detta moment. En generell ekvation för hur momentet ändras som funktion av eftersläpningen fås enligt referens [B3]:

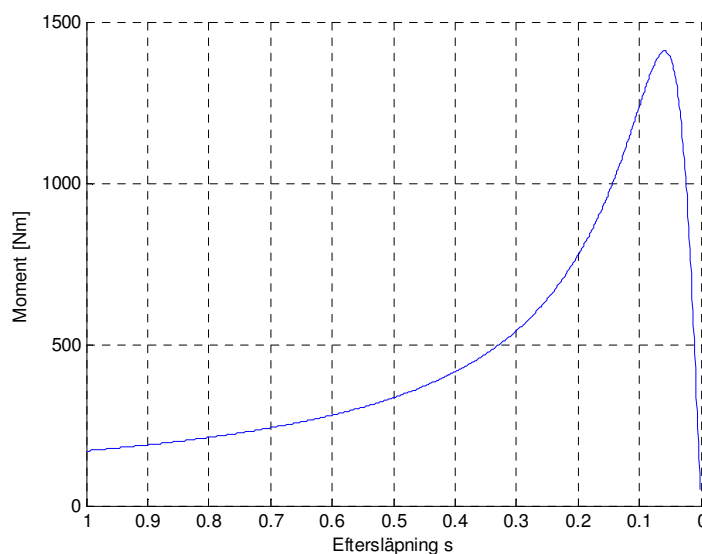
$$T_e = 3 \left(\frac{R_r}{s \omega_s} \right) \frac{V_e^2}{\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right)^2 + X_e^2}. \quad (33)$$

I (33) står V_e , R_e och X_e för:

$$V_e = \frac{jX_m V_s}{R_s + j(X_{s\lambda} + X_m)}, \quad (34)$$

$$R_e + jX_e = \frac{jX_m (R_s + jX_{s\lambda})}{R_s + j(X_{s\lambda} + X_m)} + jX_{r\lambda}. \quad (35)$$

Ett exempel på hur momentet ändras med eftersläpningen ses i Figur 10. Här har en 4-polig asynkronmaskin på 75 kW med motordata från referens [A3] plottats.

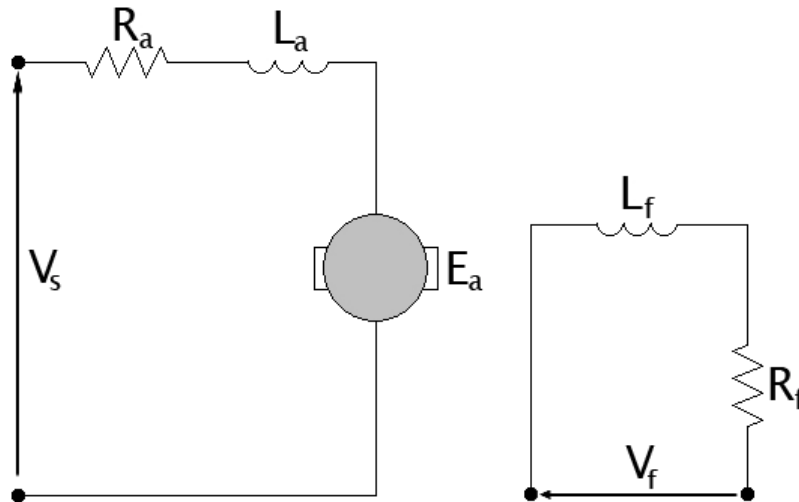


Figur 10. Momentkurva för en 4-polig 75 kW asynkronmaskin.

2.5.2 Likströmsmaskinen

Hos ÅB finns det ett mindre antal likströmsmaskiner. Det ekvivalenta schemat för en likströmsmotor syns i Figur 11. Kretsen till vänster kallas för maskinens ankare och står för det mekaniska arbetet som uträttas. Kretsen till höger symboliserar maskinens

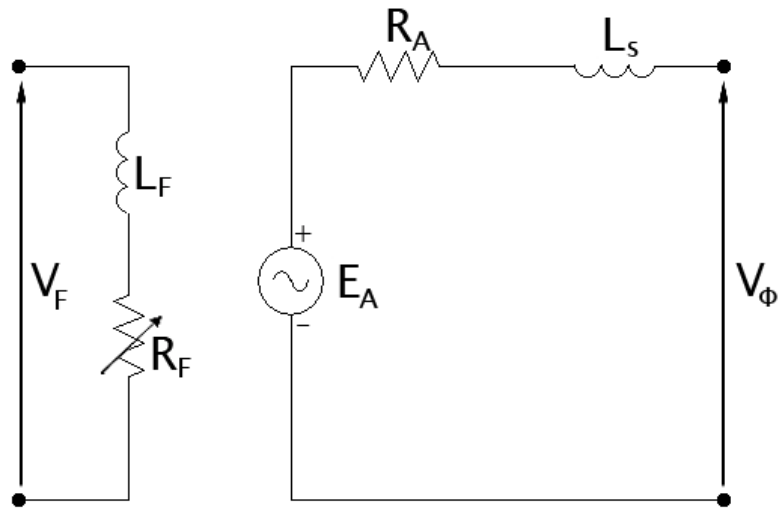
magnetiseringsförlopp. I figuren står R_a och L_a för totala förlusterna i ankaret och L_f och R_f för förluster i fältkretsen. E_a är den inducerade motspänningen som ökar linjärt med motorns varvtal [B4].



Figur 11. Det ekvivalenta schemat för en permanentmagnetiserad likströmsmaskin.

2.6 Synkrongeneratorn

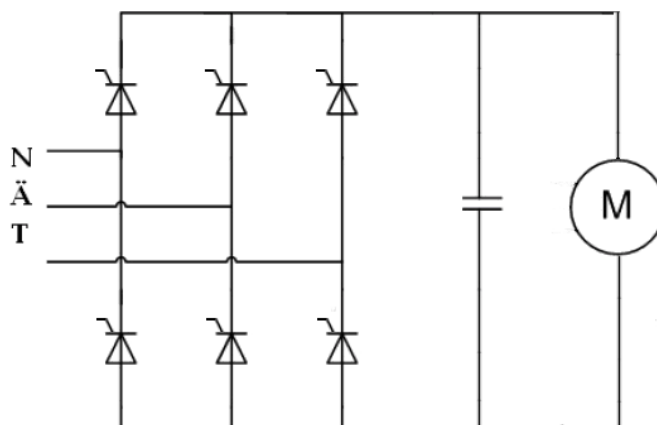
En synkrongenerator används för att konvertera mekanisk energi till elektrisk energi. Till skillnad från asynkronmotorn roterar magnetfältet synkront med varvtalet. Detta åstadkoms genom att driva en likström genom rotorn, som då uppträder som en permanentmagnet med önskad styrka. Rotorn i sin tur inducerar en spänning i statorn vars terminal nu kan belastas med en elektrisk last. I Figur 12 presenteras synkrongeneratorns ekvivalenta schema. Här står den vänstra kretsen för magnetiseringskretsen där L_F symboliserar induktiva förluster i fältkretsen och R_F står för förluster i ledarna hopslagen med en variabel resistans vars värde ställs in efter önskad fältström. I ankarkretsen till höger står E_A för inducerad spänning och V_ϕ för utspänning på generatorns terminal. Dessa är identiska endast då det inte går någon ström i ankarkretsen. När det väl går en ström (vilket är vanligast) produceras det ett magnetfält som stör magnetfältet som transporteras genom luftgapet. Statorlindningarna har även en självinduktans, och tillsammans med nämnd störning ovan bildar dessa induktansen L_s . Slutligen symboliseras resistansen i statorlindningarna med R_A [B4].



Figur 12. Synkrongeneratorns ekvivalenta schema.

2.7 Likriktare

De få likströmsmotorer som är installerade i pappersbruket behöver matas med likspänning. För att erhålla likspänning från en växelspanningskälla krävs en likriktarkrets, t.ex. så som Figur 13 visar. Här åskådliggörs en enkel modell för likriktning av en trefassspänning. Tyristorerna i kretsen leder då två villkor är uppfyllda: dels skall tyristorn vara framspänd och dels skall en tändsignal ha erhållits. På så sätt kan likströmsmotorn matas med likspänning av varierande styrka. För att få spänningen mer konstant används en kondensator parallellt som minskar det spänningsrippel som uppstår.



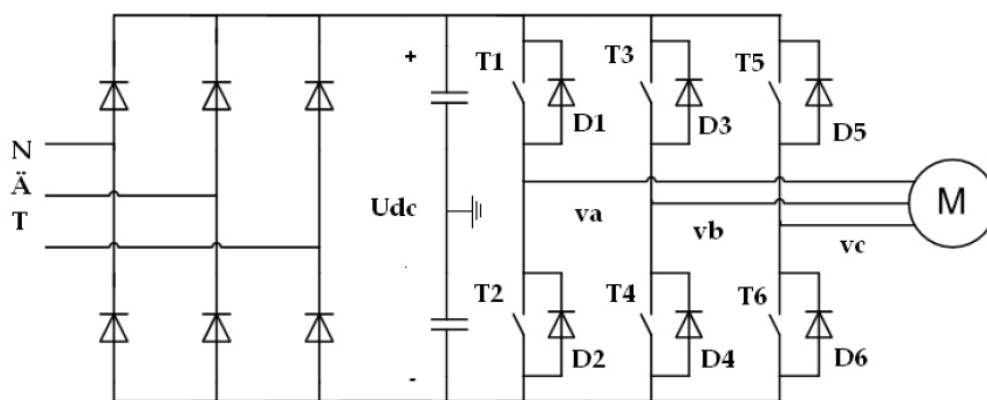
Figur 13. Trefasig tyristorlikriktare med glättningskondensator.

2.8 Frekvensomriktare

Ett vanligt sätt att styra varvtalet hos asynkronmaskiner är med hjälp av frekvensomriktare. I Figur 14 åskådliggörs ett exempel på hur denna krets kan se ut. Först likriktas nätets växelspanning till likspänning med någon form av likriktarkonfiguration. Därefter inverteras denna likspänning åter till växelspanning med hjälp av transistorer som man styr till att ge en önskad frekvens. Eftersom asynkronmaskinens varvtal är proportionellt mot spänningskällans frekvens enligt:

$$n_m = \frac{120 f_e}{p}, \quad (36)$$

kommer således varvtalet att ändras då frekvensen på inspänningen ändras [B2]. I (36) står p för antal poler.



Figur 14. Elektrisk krets för en frekvensomriktare.

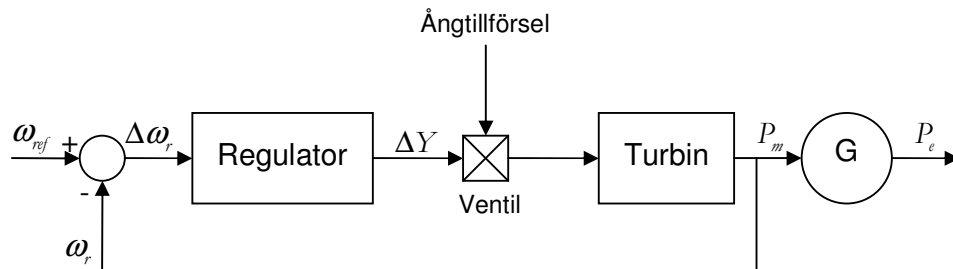
2.9 Intelligent ställverk

Många av de befintliga ställverk som idag finns inom både industrin och i elnätet är relativt gamla. Driften för dessa äldre ställverk sköts mestadels manuellt och ingen typ av kommunikation kan ske mellan de olika komponenterna. De flesta leverantörer av ställverkssystem har därför börjat utvecklingen av "intelligenta ställverk". I dessa har en större intelligens byggts in i ställverkskomponenterna för att uppnå effektivare skydd, övervakning och styrning. Datorer finns här i varje fack vilket gör att kommunikation mellan alla fack är tänkbart. Möjligheten att styra vilka drifter som skall försörjas under vissa perioder och lagring av data är två andra saker som kan användas i denna typ av ställverk [I13].

2.10 Reglersystem

I varje växelspanningssystem måste det finnas någon form av styrning av frekvens och spänning. I mer komplexa system, t.ex. elsystem, måste dessa storheter regleras. I Kapitel 2.3 nämndes att en ändring i aktiv effekt resulterar i en ändring av frekvens i systemet. En annan viktig parameter i dessa sammanhang är spänning. Det är viktigt att hålla en jämn spänningsnivå så nära nominell spänning som möjligt, annars kan apparaters livslängd förkortas och vissa motorer kan helt sonika kopplas bort. Spänning regleras genom att variera reaktiv effekt. Ett vanligt fall som förekommer i dagens elsystem är faskompensering med hjälp av kondensatorbatterier. Dessa installeras vid skenor som är belägna långt bort från spänningskällan för att kompensera för det spänningsfall som uppstår i luftledningarna. I Figur 15 visas ett enkelt och överskådligt system över den

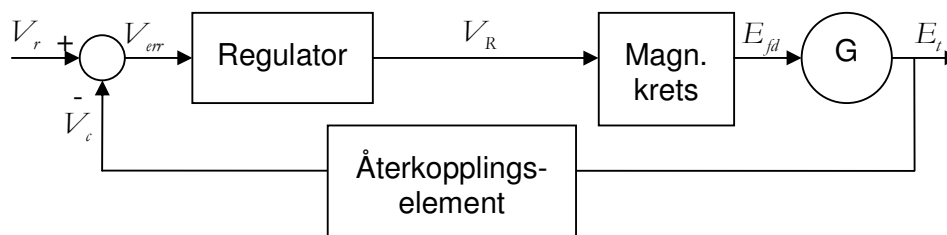
aktiva produktionsdelen i samförbränningsstationen innehållandes turbin, generator samt en regulator. Denna konfiguration används för att styra frekvensen ut från generatoren. Enkelt beskrivet öppnas ventilen olika mycket beroende på hur mycket frekvensen skiljer sig från den nominella frekvensen. Turbinen erhåller då en lägre/högre tillförsel av ånga och producerar ett mekaniskt moment därefter. Denna mekaniska effekt omvandlas till elektrisk effekt i generatoren. Varvtalet, som används till återkopplingen, kan antingen mätas som mekaniskt eller elektriskt varvtal. I Figur 15 mäts det mekaniska varvtalet, och används sedermera som återkopplingssignal.



Figur 15. Process för att reglera aktiv effekt.

I elnät med hög spänning är styrning av spänning analogt med styrning av reaktiv effekt. En synkrongenerator kan antingen producera eller absorbera reaktiv effekt beroende på rotorns magnetisering. En undermagnetiserad generator absorberar reaktiv effekt medan en övermagnetiserad generator producerar. Ett annat vanligt sätt att styra spänning är via en Static Var Compensator (SVC), där en induktans parallellt med en kapacitans kan varieras att antingen producera eller absorbera reaktiv effekt beroende på om spänningen behöver ökas eller sänkas. Det har även utvecklats en komponent, likvärdig med SVC, fast med mycket snabbare dynamik. STATCOM heter denna nya produkt, framtagen av ABB, som använder sig av snabbswitchande halvledarteknik för att bl.a. kompensera mot flimmer, kontrollera spänning och filtrera bort övertoner [14].

I Figur 16 beskrivs ett klassiskt sätt att styra spänning. Skillnaden mellan bör- och ärvärdet förstärks i en regulator, som därefter ger en signal till magnetiseringskretsen. Detta kan t.ex. vara information om thyristorernas tändningsvinkel. Därefter levereras det en spänning till rotorns lindningar. Slutligen mäts statorspänningen på generatoren med en spänningstransformator och via andra återkopplingselement går signalen tillbaka och processen upprepas [B2].



Figur 16. Ett klassiskt sätt att reglera utspänning.

2.11 Regleregenskaper

Regleregenskaper skiljer olika kraftverk åt med avseende på aktiv effekt. En viktig parameter i dynamiska sammanhang är den tid det tar för ett kraftverk att snabbt kunna ändra sin produktion av aktiv effekt. Denna tid skiljer sig avsevärt för olika typer av kraftslag. I Tabell 2 åskådliggörs dessa.

Tabell 2. Olika kraftslag (anläggningar större än 25 MW) och krav på deras reglerhastigheter [I15].

Anläggningstyp	Reglerhastighet [%/minut]	Reglerområde [% av nom. effekt]	Effektområde [% effekt]
Vattenkraft	40	100	0-100
Kolkondens	4	30	60-90
Oljekondens	8	30	40-90
Kraftvärmeverk	4	30	60-90
Kärnkraftverk (PWR)	5	30	60-90
Kärnkraftverk (BWR)	10	30	60-90
Gasturbin av jettyp	20	100	0-100
Gasturbin av industrityp	7	100	0-100

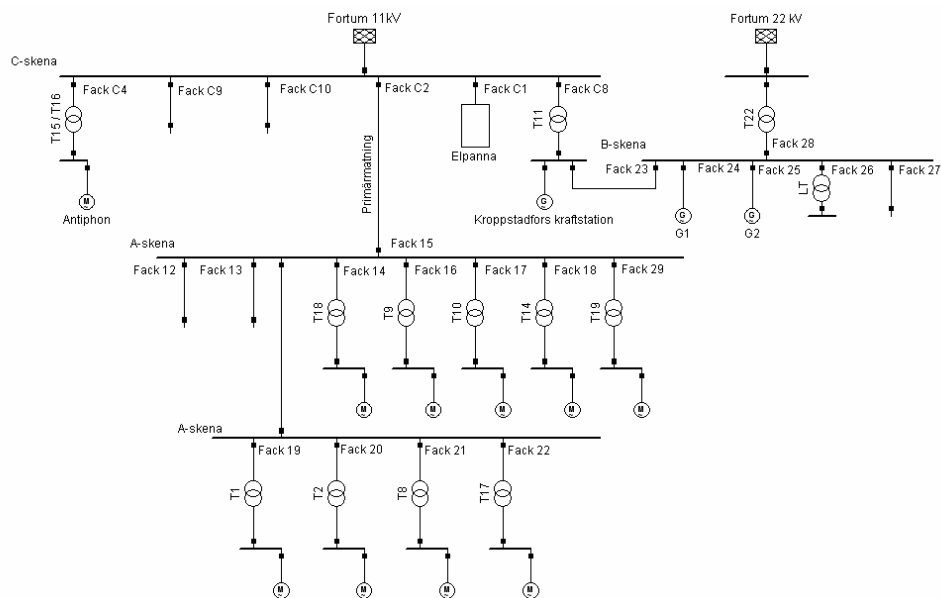
Reglerhastigheten relateras till anläggningens nominella effekt. Reglerområdet avser ett effektintervall inom definierat effektområde.

3 Åmotfors Bruk

Kapitlet Åmotfors Bruk behandlar information om pappersbrukets enlinjeschema, ritningar på området och befintlig komponentdata.

3.1 Ritningar och bilder

I Figur 17 visas ÅBs enlinjeschema uppritat i DIGSILENT så som det ser ut i dagsläget. Figuren visualiserar också hur facken är utnyttjade på C-skenan som ligger i det ställverk där transformationen 130/11 kV sker. Fack C1 representerar den elpanna som i skrivande stund står för den största delen av ÅBs ångproduktion. C-skenan försörjer också ett lokalt företag som heter Antiphon via fack C4 och är även kopplad till ett mindre vattenkraftverk på 4 MVA, Kroppstadfors. Kvar finns två lediga fack på C-skenan, fack C9 och fack C10. Från fack C2 sker i dagsläget primärmatningen till ÅB. ÅBs spänningsnivåer åskådliggörs i Tabell 3.

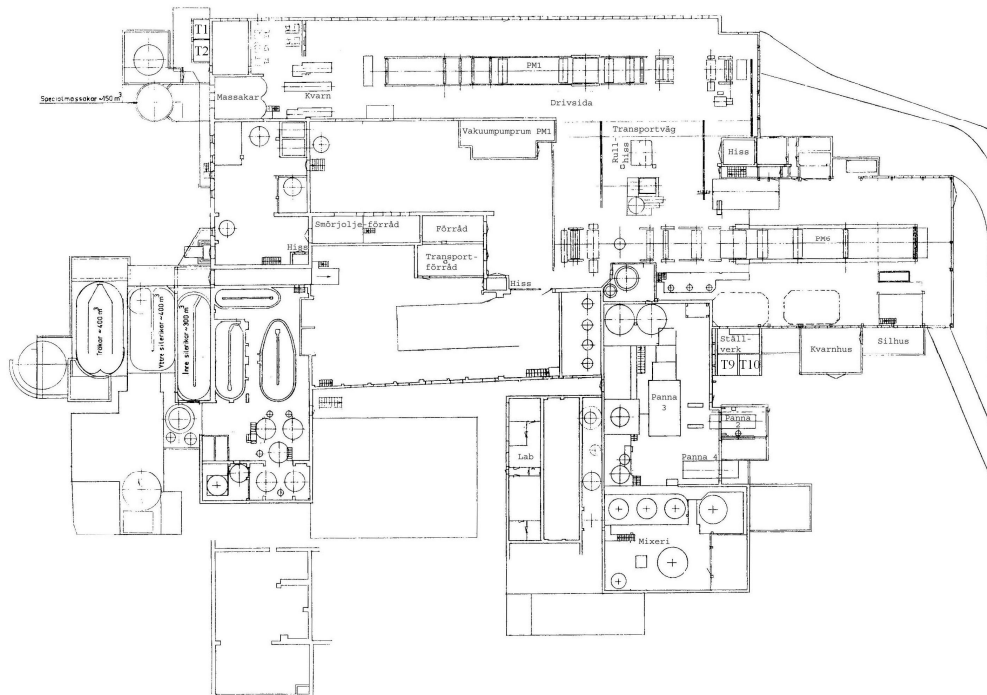


Figur 17. Enlinjeschema över elförsörjningen för ÅB i dagsläget.

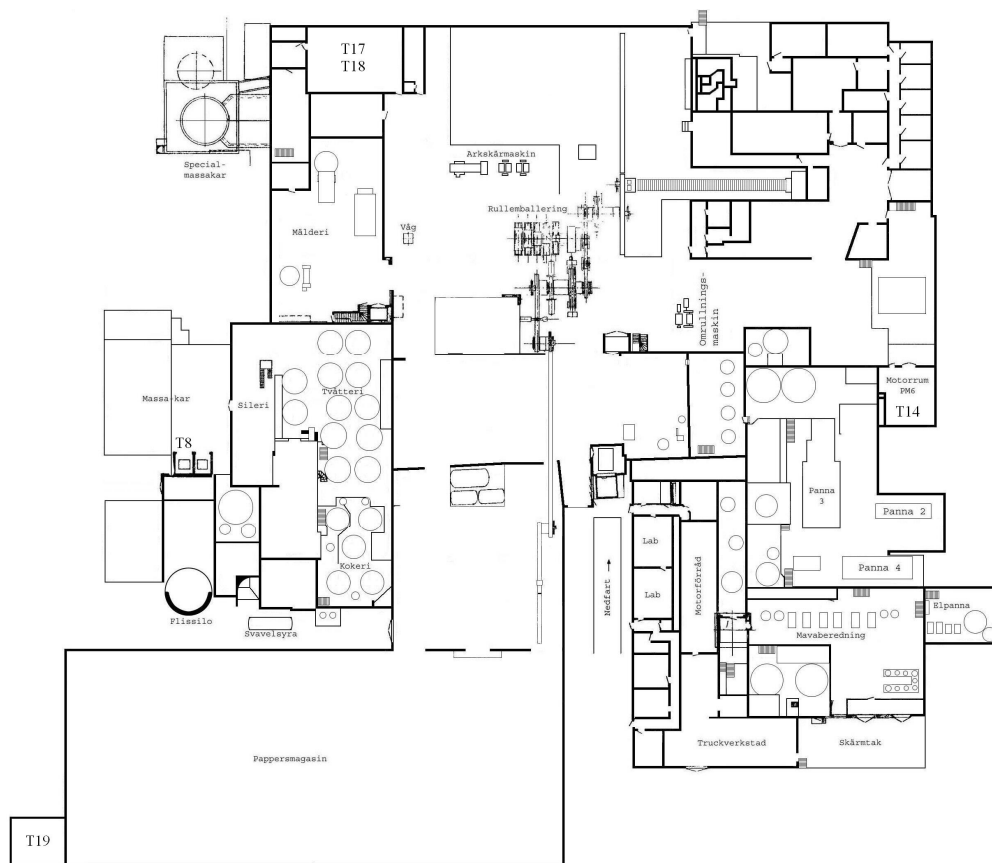
A-skenan är belägen i ett mellanspanningsställverk på 11 kV och ägs av ÅBAB. Det finns 12 fack, varav nio stycken används till försörjning av transformatorer i ÅB och två

stycken som i dagsläget står tomma. Ett av de tomma facken, fack 12, kommer senare att användas som sekundärmatning och kopplas då in i fack C9 på C-skenan.

De olika lågspänningsställverken är geografiskt utspridda runt omkring på området och innehåller transformatorer som betecknas med T1, T2 o.s.v. vilket står för "transformator 1" respektive "transformator 2". I Figur 18 och Figur 19 åskådliggörs dessa transformatorers geografiska läge i fabriksbyggnaden.



Figur 18. Ritning över fabriksbyggnadens nedre plan (maskinplan). På detta plan är T1, T2, T9 och T10 placerade.



Figur 19. Ritning över fabriksbyggnadens övre plan. På detta plan är T8, T14, T17, T18 och T19 placerade.

Exempel på hur dessa är placerade i verkligheten kan åskådliggöras i Figur 20 och i Figur 21. I Figur 20 ses hur ställverket innehållandes T8 ser ut på utsidan, medan Figur 21 visar T9 och T10 som är placerade utomhus.

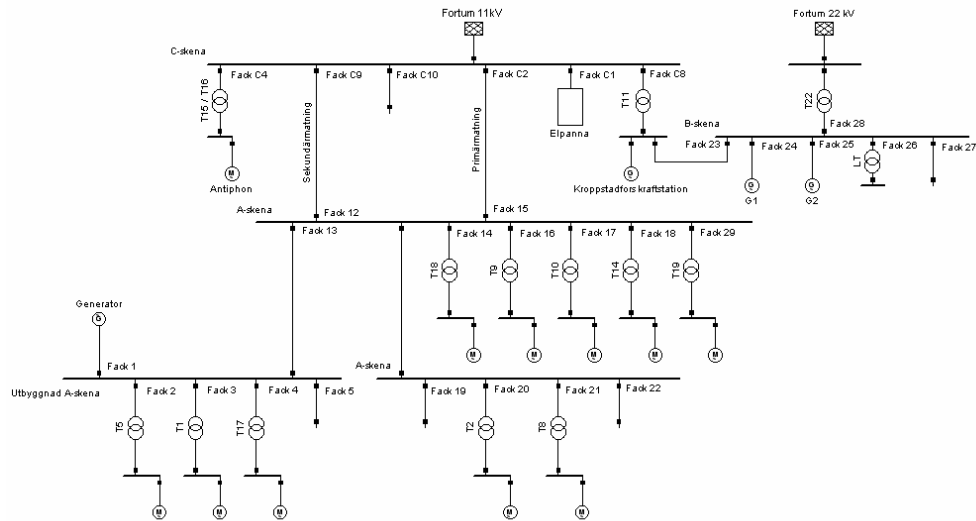


Figur 20. Lågspänningsställverk med transformator T8.



Figur 21. Transformator T9 och T10 sett utifrån.

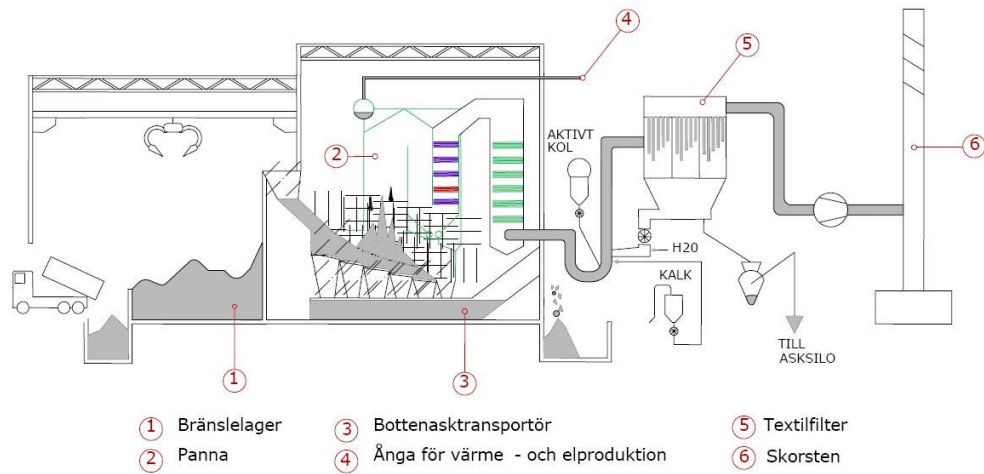
För att den nya samförbränningsstationen skall få plats krävs en utbyggnad av A-skenan vilket Figur 22 illustrerar. Här har även sekundärmatningen kopplats in och ett alternativ för hur ö-nätet skulle kunna se ut är presenterat.



Figur 22. ÅB med den nya utbyggnaden samt en alternativ omorganisation av de interna transformatorerna.

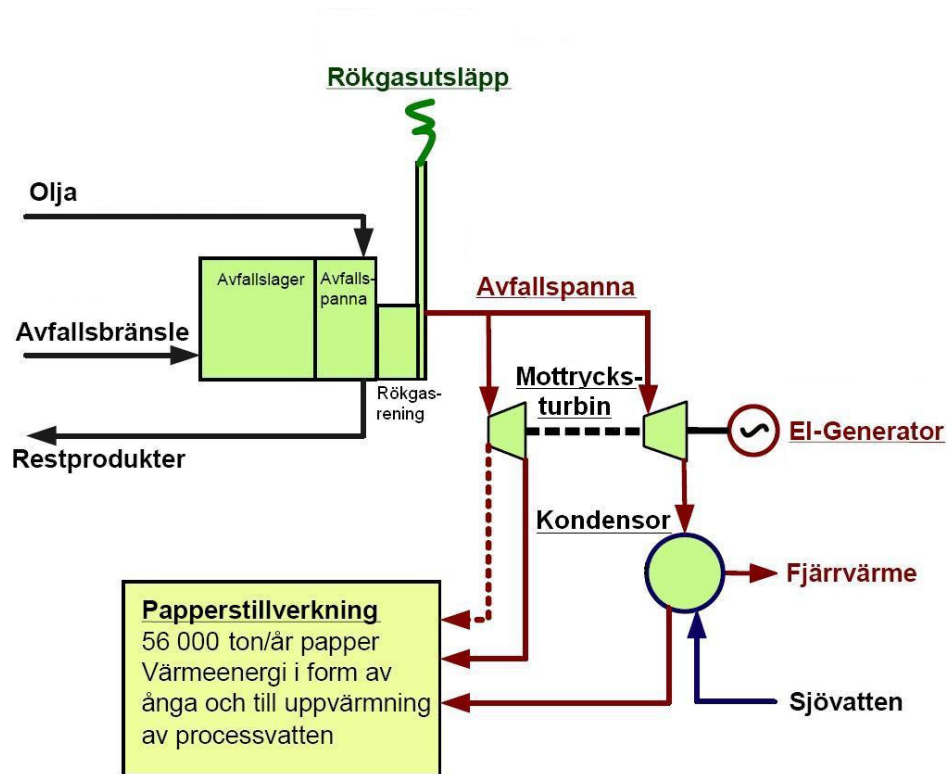
3.2 Samförbränningsstationen

Den tilltänkta samförbränningsstationen kommer att vara uppbyggd på samma sätt som visas i Figur 23. I en del av byggnaden tömmer inkommande lastbilar avfall som sedan förs vidare till förbränningspannan. Avfallet förbränns och förångar vatten som går vidare till värme- och elproduktion. Aktivt kol och andra filter renar därefter rökgasen som sedan släpps ut genom skorstenen.



Figur 23. Principskiss över samförbränningsstationen [I3].

I Figur 24 åskådliggörs värme- och elproduktionen mer i detalj. Den största delen av ångan används i papperstillverkningen som värmeenergi och uppvärmning av processvattnet. Den ånga som blir över transporteras till ångturbinen för tillverkning av elektricitet via generatoren. Resterande ånga går genom kondensorn och sedan ut i fjärrvärmenätet runt om Åmotfors. För att kunna kondensera ånga till vatten tas sjövattnet in från den närliggande Asksjön. Samförbränningsstationen producerar även en del restprodukter i form av bottenaska i pannan och flygaska vid rökgasreningen. Stationen innefattas också av en oljeeldad panna som används som reservpanna utifall avfallspannan skulle fallera.



Figur 24. Energi- och materialflöden till och från samförbränningsstationen [I3].

3.3 Komponentdata

För att simuleringen skall bli så realistisk som möjligt behöver all befintlig komponentdata tas i beaktning. I kapitlen 3.3.1 - 3.3.4 beskrivs dessa närmare.

3.3.1 Transformatorer

I dagsläget finns nio stycken transformatorer som är matade från ÅBs mellanspänningsställe (läs mer om detta i Kapitel 4.2.2.2). I Tabell 3 ses en lista över de olika transformatorerna samt deras märkeffekt, koppling o.s.v.

Tabell 3. Transformatorer vid ÅB.

Transformator	Märkeffekt [MVA]	Koppling	e_k [%]	Omsättning
T1	2	Yyn0	5	11/0.4
T2	2.5	Yyn0	5	11/0.69
T5	2	Dyn11	6	11/0.4
T8	1.5	Yyn0	5	11/0.4
T9	1.5	Yyn0	5	11/0.4
T10	2	Yyn0	5	11/0.4
T14	1.5	Yyn0	5	11/0.4
T17	1.6	Yyn0	5	11/0.4
T18	2	Yyn0	6	11/0.4
T19	1.5	Yyn0	5	11/0.4

3.3.2 Kondensatorbatterier

Kompensationen för reaktiv effekt sker genom kondensatorbatterier som är utplacerade på varje lågspänningsställverk. Tabell 4 visar storleken på dessa i nuläget.

Tabell 4. Storlek på kondensatorbatterier vid varje lågspänningsställverk.

Transformator	T1	T2	T8	T9	T10	T14	T17	T18	T19
Q [kVAr]	400	520	300	600	400	600	600	400	300

3.3.3 Kablar

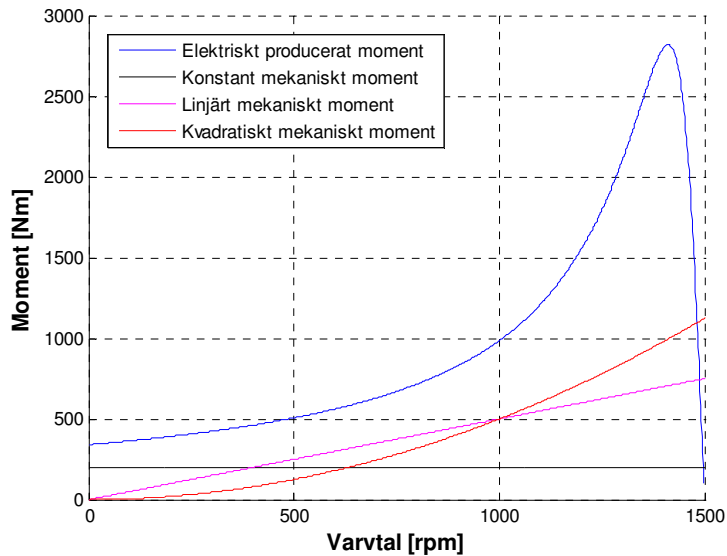
Från fack C2 till fack 15 går den primära matningen av ÅB. Denna matning består av tre stycken parallella AXCEL 240 kablar som vardera är 200 m långa. Denna typ av kabel är en treledarkabel med parametervärden enligt Tabell 5. Sekundärmatningen som går från fack C9 till fack 12 har samma typ av kabel, fast här har två stycken kablar använts på vardera 150 m.

Tabell 5. Parametervärden för AXCEL 240 kabel.

R [Ω/km]	L [mH/km]	C [μF/km]
0.125	0.27	0.42

3.3.4 Mekaniska laster

De mekaniska laster som motorerna i pappersbruket driver är av stort intresse. Beroende på vad det är för slags last ändras momentkaraktärstiken och således effektförbrukningen. Nedan i Figur 25 visas motors producerade elektriska moment samt tre mekaniska laster av olika karaktär. Ett konstant mekanisk moment kan t.ex. symbolisera ett drivband, en omrörare har ett linjärt varvtalsberoende och slutligen kan en pump eller fläkt moduleras med ett kvadratisk beroende. I pappersbruket består de mekaniska lasterna överlag av pumpar och fläktar, varför alla aggregerade motorer fått en kvadratisk karaktärstik.



Figur 25. Momentkaraktärstik för olika mekaniska laster

4 Problemlösning

Här kommer problemställningarna att behandlas samt simuleringar och resultat att redovisas.

4.1 Antaganden

Som tidigare nämnts i denna rapport är kvalificerade antaganden av stor vikt. Nedan följer bakomliggande information och tillvägagångssätt till de antaganden som gjorts i denna rapport.

4.1.1 Motordata

I varje asynkronmaskin finns det åtskilliga parametrar av intresse för att kunna göra en korrekt simulering i mjukvaran. Ett enkelt sätt att bestämma dessa parametrar är genom att utföra ett tomgångsprov och ett kortslutningsprov. I detta examensarbete fanns inga parametrar att tillgå, ej heller vore det ett alternativ att testa de hundratals asynkronmaskiner som det rör sig om. Därför har det med hjälp av referenserna [B5] och [A1] tagits fram en lista (se Tabell 6) med parametervärden som ger en tillräcklig bra approximation för det ändamål som söktes, nämligen de dynamiska egenskaperna ur ett elsystemsperspektiv. De motorer som finns installerade i pappersbruket har tilldelats en grupp beroende på dess motorstorlek. Med andra ord har ett flertal motorstorlekar definierats med parametrar, sedan har pappersbrukets riktiga motorer placerats i den kategori som varit närmast.

Resistanserna och induktanserna i Tabell 6 är angivna i p.u. med motorstorleken som effektbas (P_b) och med en spänningsbas på $U_b = 400 \text{ V}$. De fysikaliska parametrarna kan då tas fram för varje enskild motor enligt:

$$Z = Z_{pu} \frac{U_b^2}{P_b}. \quad (37)$$

Tabell 6. Estimerade motorparametrar.

Motorstorlek [kW]	R_s [p.u.]	$X_{s\lambda} = X_{r\lambda}$ [p.u.]	X_m [p.u.]	R_r [p.u.]	J [kgm ²]
355	0.00422	0.08357	2.233	0.00844	7.5
315	0.00403	0.07495	1.808	0.00806	7.4
250	0.00389	0.07471	1.441	0.00778	6.6
200	0.00369	0.08355	2.085	0.00737	4.0
160	0.00394	0.08348	2.004	0.00788	3.5
132	0.00425	0.07535	1.954	0.00849	2.7
110	0.00272	0.07659	2.018	0.00544	1.2
90	0.00584	0.08326	2.121	0.01169	1.05
75	0.00535	0.09253	2.052	0.01070	0.9
55	0.00674	0.09144	1.721	0.01349	0.8
45	0.00554	0.09592	1.67	0.01108	0.41
37	0.00734	0.07158	1.992	0.01468	0.83
30	0.00870	0.08189	2.341	0.01739	0.76
22	0.01036	0.07227	1.678	0.02072	0.19
19	0.01147	0.06608	1.678	0.02293	0.277
15	0.01321	0.07381	3.122	0.02642	0.22
11	0.00823	0.0714	2.512	0.01646	0.10
8	0.01549	0.07874	1.055	0.03097	0.082

4.1.2 Aggregering

En vanlig situation som uppträder i elsystem är att flera elektriska maskiner är inkopplade vid samma samlingsskena. Detta är vid simulering både tidskrävande (alla maskiner skall kopplas in och definieras i tur och ordning) och ökar den totala simuleringstiden. Är man dock bara intresserad av alla dessa maskiner som en enhet finns det en metod som sammanfogar dessa, s.k. aggregering. En litteratursökning på aggregering ger ett flertal metoder, alltifrån relativt enkla algebraiska operationer till mer komplexa itereringsmetoder. I detta examensarbete har tyngden ej lagts på de mer avancerade metoderna, utan den enklast möjligaste metoden kommer att användas

4.1.2.1 Effekt

Här antas att den effekt varje maskin absorberar från nätet adderas med nästkommande och bildar den totala effekten:

$$P_{agg} = \sum_{j=1}^n P_j . \quad (38)$$

4.1.2.2 Impedanser

En motor väljs i listan som ligger i mitten av effektspannet av alla motorer kopplade till respektive transformator. Den totala effekten divideras med märkeffekten på denna motor. De aggregerade impedanserna erhålls sedan genom att dividera impedanserna på den valda motorn med denna faktor.

Om parametrarna är angivna i p.u. finns det ingen anledning till sådana omständliga beräkningar som nämnts ovan. Eftersom alla impedanser refereras till respektive maskins bas blir utgången densamma som att bara överföra befintliga parametrar för vald motor i effektspannet till den nya aggregerade maskinens bas. Den aggregerade maskinens fysikaliska parametrar skall divideras med faktorn som fås när den totala effekten divideras med vald maskins effekt. Detta ger en minskning av parametrarna med denna faktor. När sedan denna impedans överförs till den aggregerade maskinens bas ökas impedanserna med kvoten av de båda baserna, som kommer vara kvoten mellan den aggregerade maskinens effekt och den valda maskinens effekt. Därför behövs ingen omvandling göras vilket kan härledas fram ur:

$$Z_{2_{pu}} = Z_{1_{pu}} \left(\frac{U_{b1}}{U_{b2}} \right)^2 \frac{S_{b2}}{S_{b1}} . \quad (39)$$

De aggregerade maskinerna åskådliggörs i Tabell 7.

Tabell 7. Parametrar för de aggregerade maskinerna.

Matande transformator	Märk-effekt [MVA]	Motor-storlek [kW]	Effekt-förbrukning [kW]	R_s [p.u.]	$X_{s\lambda} = X_{r\lambda}$ [p.u.]	X_m [p.u.]	R_r [p.u.]
T1	2	1791	906	0.00535	0.09253	2.052	0.01070
T2	2.5	1420	960	0.00422	0.08357	2.233	0.00844
T5	2	1695	600	0.00870	0.08189	2.341	0.01739
T8	1.5	1280	704	0.00734	0.07158	1.992	0.01468
T9	1.5	1591	919	0.00272	0.07659	2.018	0.00544
T10	2	1749	1085	0.00272	0.07659	2.018	0.00544
T14	1.5	1686	948	0.00272	0.07659	2.018	0.00544
T17	1.6	1453	675	0.00535	0.09253	2.052	0.01070
T18	2	1390	942	0.00535	0.09253	2.052	0.01070
T19	1.5	623	443	0.00674	0.09144	1.721	0.01349

4.1.2.3 Tröghetsmoment

Varje asynkronmotor har en egenresonansfrekvens, d.v.s. den frekvens som motorn klingar in med under en start. Denna frekvens kan beräknas enligt:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (40)$$

Nu beräknas denna frekvens med den valda maskinens parametrar. Dock är J av intresse, varför en analogi kan införskaffas. Ekvation (40) kan skrivas om som:

$$f_0 \sim \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LJ}}. \quad (41)$$

Denna fiktiva f_0 beräknas för den valda maskinen. Nu skall denna fiktiva frekvens bibehållas för den aggregerade motorn. Detta görs genom att använda den framräknade induktansen från den aggregerade motorn och lösa ut J från (41). I Tabell 8 visas tröghetsmomentet hos de aggregerade maskinerna.

Tabell 8. Tröghetsmomentet hos de aggregerade maskinerna.

Matande transformator	T1	T2	T5	T8	T9	T10	T14	T17	T18	T19
J [kgm ²]	21.5	30.0	42.9	28.7	17.4	19.1	18.4	17.4	16.7	9.1

4.1.3 Generatoren

Då generatoren inte är upphandlad i skrivande stund har antaganden för dess parametrar gjorts. Generatoren skall ha en skenbar effekt på ca 2.8 MVA och producera ca 2.6 MW aktiv effekt. Spänningen är 11 kV och den skall vara av typen synkrongenerator. Utifrån dessa data har antaganden gjorts tillsammans med personer på ABB i Västerås (se Bilaga 1). Resultatet presenteras i Tabell 9.

Tabell 9. Parametrar för den tänkta samförbränningsstationens generator.

Tidskonstant [s]	Mekanisk dämpning [%]	$X_{d,sat}$ [p.u.]	$X_{q,sat}$ [p.u.]	R_s [Ω]	R_r [Ω]
0.74	1-1.25	1.69	0.84	0.16	0.033

4.1.4 In- och urkoppling till ö-drift

Det finns två olika sätt att gå in i ö-drift, dessa kommer att betecknas manuell respektive automatisk inkoppling. Manuell inkoppling görs genom att slå till en brytare manuellt. Detta sker när förebyggande metoder ligger i grund för ett åskväder, eller när man under planerade stopp vill isolera ÅB från det externa nätet. I fallet då åska föreligger inträdandet i ö-drift önskas det att produktionen skall fortsätta normalt. Detta medför att alla laster på de transformatorer som ligger i ön skall ha försörjning. I de simuleringar som görs senare i denna rapport har antagandet att brytningen sker momentant gjorts.

Automatisk inkoppling sker då det externa nätet blir spänningslöst. Då slår brytaren ifrån per automatik. För att inte spänningsdippar (som kan ske då någon närliggande bebyggelse upplever ett kortslutningsfel) skall åstadkomma urkoppling från det externa nätet har en fördröjning för ö-nätsbrytaren på 200 ms lagts in. Denna tid har grundats på värden från [B6] där ett typiskt värde för ett 115 kV-distributionsnätverk i USA har presenterats. Tiden står för ett "värsta fallet"-scenario och är den tid som brytaren

avvaktar innan den bryter kopplingen. Själva brytartiden är på 167 ms, men en ytterliggare fördröjning på 33 ms har lagts till för att vara säker på att det inte rör sig om en spänningsdipp. Vid en automatisk inkoppling kommer ej alla de motorer som är matade från de transformatorer som ligger i ön att vara i drift. Detta p.g.a. att vissa laster ligger i produktionsdelar i pappersbruket som ej är i drift. Då pappersbruket ej använder sig av intelligenta ställverk kommer bortkoppling av enskilda drifter att ske med hjälp av en kontaktor, som slår ifrån då den via en extern koppling ej känner att spänning finns på pappersbrukets övriga skenor.

4.2 Alternativ för belastningsförhållanden i ö-drift

Det finns åtskilliga sätt i teorin att placera laster, transformatorer och kablage. Dock är det verkliga fallet mer komplicerat, vilket måste tas hänsyn till.

4.2.1 Prioriterade laster

En av de stora fördelarna med ö-drift är att det fortfarande är möjligt att mata vissa viktiga laster med effekt under strömavbrott i det externa nätet. Detta bidrar till förkortade uppstartningstider, vilket resulterar i ekonomiska besparingar. För ÅB handlar det om att kunna använda sig av pumpar och kompressorer för att klara av rengöring och för att kunna hantera en eventuell brand under strömavbrottet. I huvudsak är det pumpar till vattenförsörjning som prioriteras. Som åskådliggörs i Tabell 10 är det nio stycken större motorer som kommer att ha fortsatt matning under ö-drift. Belysningen är även den högst relevant att ha med under ö-drift. Enligt Tabell 10 är det fem transformatorer som är berörda, det mesta ligger dock på T1 och T17.

Tabell 10. Prioriterade lasterna för ÅB i ö-drift.

Motor	Trans- formator	Motordata	Drift	Ström [A]	Effekt- förbrukning [kW]
Färskvattenpump	T1	200 kW, 4-pol	I drift 365 dagar/år	180	100
Slampump 1	T1	75 kW, 4-pol	I drift 365 dagar/år	80	44
Slampump 2	T1	75 kW, 4-pol	Reserv		
Slampump 3	T1	75 kW, 4-pol	Reserv		
Brandpump	T1/T8	45 kW	Vid brand	60	45
Kompressor 1	T1	150 kW, 8-pol	Reserv	190	
Kompressor 2	T10	160 kW, 4-pol	I drift 365 dagar/år	400	220
Hetkalander s-vals	T17	66,1 kW		100	44
Hetkalander bottenvals	T17	66,1 kW		100	44
Belysning	T1/T8/T10/ T19		I drift 365 dagar/år	286	66

För att klara av en automatisk inkoppling till ö-drift måste ö-nätet bestå av drifter som kan köras skilt från de resterande maskinerna i pappersbruket. Dessa kan t.ex. vara olika sorters fläktar, valsar och vissa pumpar. Tabell 11 visar de drifter som kan vara lämpliga att köra.

Tabell 11. Drifter som kan köras i ö-drift.

Motor	Trans- formator	Motordata	Ström [A]	Effekt- förbrukning [kW]
Torkluftfläkt	T1	45 kW, 2-pol	20	11
Våtluftfläkt	T1	55 kW, 4-pol	50	28
U-vira guskvals	T17	110 kW	130	57
U-vira nosvals	T17	143 kW	95	42
Ö-vira nosvals	T17	99 kW	70	31
Ö-vira egotteur	T17	99 kW	70	31
Pick-upvals	T17	84 kW	90	40
2:a:press granitvals	T17	39,5 kW	50	22
2:a:press räfflad vals	T17	68 kW	90	40
3:e:press granitvals	T17	39,5 kW	140	62
3:e:press räfflad vals	T17	110 kW	10	4
Torkgrupp 1	T17	68 kW	65	29
Torkgrupp 2	T17	45,5 kW	25	11
Yankee	T17	110 kW	80	35
Torkgrupp 3	T17	45,5 kW	5	2
Pope	T17	39,5 kW	45	20
Vakuumpump 079	T18	75 kW, 6-pol	110	61
Vakuumpump 082	T18	160 kW, 4-pol	210	116
Vakuumpump 083	T18	160 kW, 4-pol	200	111

För att valsarna som försörjs från T17 skall kunna köras på medeleffektförbrukning behövs tre stycken vakuumpumpar som matas från T18.

4.2.2 Ö-nätets utformning

Det ö-nät som skall utformas kan se ut på olika sätt beroende på belastning och geografisk placering. Kapitlen 4.2.2.1 och 4.2.2.2 beskriver detta mer ingående.

4.2.2.1 Laster

Under ö-drift kan generatorn försörja ön med ca 2.6 MW aktiv effekt. Enligt Tabell 7 skulle de fem transformatorerna som berörs att dra en effekt på ca 3.9 MW. Då samförbränningsstationen har ett eget effektbehov på ca 0.6 MW, från transformator 5 (T5), skulle detta inte vara genomförbart. En omorganisering av drifterna är därför en nödvändighet. För att upprätthålla säkerheten vid eventuell brand måste minst två transformatorer matas från ön. Detta för att det alltid skall finnas möjlighet att kunna använda brandpumpen. Samma sak gäller även för slampumpen och kompressorn. Enligt Tabell 11 försörjer T17 flest drifter som är lämpliga att köra i ö-drift. T17 samt T1, som försörjer flest av de prioriterade drifterna, är därför två bra kandidater att spänningssätta i ö-drift. Den sammanlagda effektförbrukningen för dessa två blir ca 1.6 MW, och med T5 ger denna konfiguration en effektförbrukning på ca 2.2 MW.

Motorn "Kompressor 2" (se Bilaga 2) måste också försörjas under ö-drift vilket gör att den behöver flyttas från sin nuvarande position (T10). T1 och T17 ligger relativt långt bort från T10 (se Figur 18 och Figur 19), men då T1 är placerad på samma våningsplan som T10 flyttas "Kompressor 2" dit. Brandpumpen, som är matad från både T1 och T8, blir nu istället matad från T1 och T17. Belysningen från T8, T10 och T19 flyttas till T1 då det är bekvämt att ha all belysning samlad på ett och samma ställe. Både T1 och T17 klarar i dagsläget av en ökning med 40 % respektive 50 % av sin märkeffekt vilket motsvarar ca 650 kW för T1 och ca 600 kW för T17. Den totala effekttökningen hos T1 kommer att bli ca 270 kW i och med flytten av alla ovan nämnda drifter. För T17 ligger denna siffra enbart på 45 kW. Den totala effektförbrukningen i ön är nu på ca 2.5 MW, vilket ligger inom gränsen på 2.6 MW.

De tre vakuumpumparna (försörjda från T18) som måste vara i gång för att valsarna på T17 skall kunna gå med önskad effektförbrukning, kan flyttas till T17. Effektförbrukningen skulle då öka med ytterligare 288 kW på T17 vilket till synes inte är några problem. Vid en manuell inkoppling av ö-driften skulle nu effekten i ö-nätet överskrida generatorns producerade effekt. Då vissa drifter så som brandpumpen endast används korta tider och inte så frekvent kommer den genomsnittliga effekten i ö-nätet bli ca 2.76 MW. Detta anses som en rimlig överbelastning av generatorn då ö-drift inte kommer att användas så frekvent. Möjligheten att koppla in de tre vakuumpumparna via kabel och kontaktor från T17 till T18 är också genomförbart. I detta fall slipper man driva

vakuumpumparna från ön vid manuell inkoppling och slipper på så sätt överbelastningen av generatorn. När automatisk inkoppling sker kopplas vakuumpumparna bort från T18 och försörjs från T17 via kabel.

Efter att alla drifter anpassats till ö-drift kommer de nya aggregerade maskinerna ha värden enligt Tabell 12 och Tabell 13.

Tabell 12. Parametrar för de aggregerade maskinerna efter anpassning till ö-drift.

Matande transformator	Märk-effekt [MVA]	Motor-storlek [kW]	Effekt-förbrukning [kW]	R_s [p.u.]	$X_{s\lambda} = X_{r\lambda}$ [p.u.]	X_m [p.u.]	R_r [p.u.]
T1	2	1946	1191	0.00535	0.09253	2.052	0.01070
T2	2.5	1420	960	0.00422	0.08357	2.233	0.00844
T5	2	1695	600	0.00870	0.08189	2.341	0.01739
T8	1.5	1235	704	0.00734	0.07158	1.992	0.01468
T9	1.5	1591	919	0.00272	0.07659	2.018	0.00544
T10	2	1434	865	0.00584	0.08326	2.121	0.01169
T14	1.5	1686	948	0.00272	0.07659	2.018	0.00544
T17	1.6	2128	964	0.00584	0.08326	2.121	0.01169
T18	2	995	653	0.00674	0.09144	1.721	0.01349
T19	1.5	623	443	0.00674	0.09144	1.721	0.01349

Tabell 13. Tröghetsmomentet hos de aggregerade maskinerna efter anpassning till ö-drift.

Matande transformator	T1	T2	T5	T8	T9	T10	T14	T17	T18	T19
J [kgm ²]	23.4	30.0	42.9	27.7	17.4	16.7	18.4	24.8	14.5	9.1

Vid automatisk inkoppling av ö-drift kommer enbart de prioriterade lasterna samt de laster som kan köras i ö-drift att försörjas. Pappersbrukets tillverkning ligger nu nere och en rengörings- samt uppstartningsprocess startas. Effekten i ö-nätet ligger nu enligt Tabell 14 på 1870 kW.

Tabell 14. Effektförbrukning i ö-nätet efter automatisk inkoppling.

Drifter	Effektförbrukning [kW]
Prioriterade laster (Tabell 10)	518
Ö-driftslaster (Tabell 11)	752
T5:s egenförbrukning	600
Totalt	1870

Aggregeringen av maskinerna kommer nu att bli lite annorlunda då vissa drifter inte används i ö-drift, dessa värden kan ses i Tabell 15 och Tabell 16.

Tabell 15. Parametrar för de aggregerade maskinerna i ö-nätet vid automatisk inkoppling.

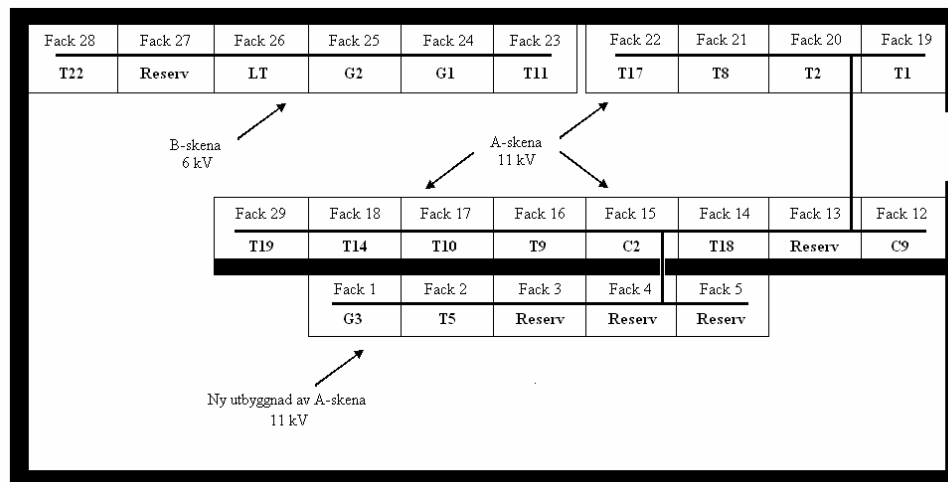
Matande transformator	Märkeffekt [MVA]	Motorstorlek [kW]	Effektförbrukning [kW]	R_s [p.u.]	$X_{s\lambda} = X_{r\lambda}$ [p.u.]	X_m [p.u.]	R_r [p.u.]
T1	2	840	469	0.00272	0.07659	2.018	0.00544
T5	2	1695	600	0.00870	0.08189	2.341	0.01739
T17	1.6	1908	801	0.00584	0.08326	2.121	0.01169

Tabell 16. Tröghetsmomentet hos de aggregerade maskinerna efter anpassning till ö-drift.

Matande transformator	T1	T5	T17
J [kgm ²]	9.2	42.9	22.3

4.2.2.2 Placering

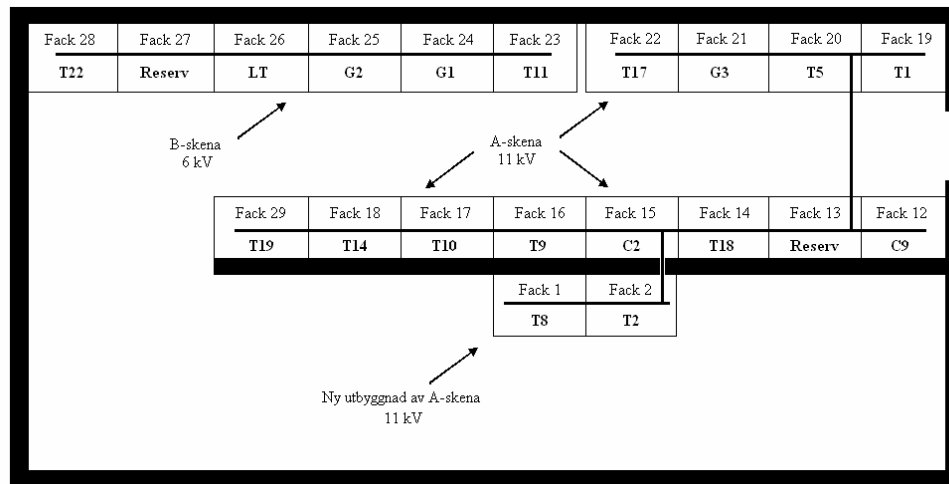
Figur 26 visar mellanspänningsställverket på 11 kV med den nya utbyggnaden av A-skenan. I den nya delen i ställverket finns det utrymme för nya installationer av fack. Ett exempel visas i Figur 26 där de nya installationerna har placerats i det nya rummet. Här finns det även möjlighet och utrymme att införa reservfack samt placera alla tänkbara transformatorfack som skall försörjas i ö-drift.



Figur 26. Översigtsbild över mellanspänningsställverkshuset med den nya utbyggnaden av A-skenan.

Att flytta T1 och T17 från sina nuvarande fack till den nya utbyggnadens fack skulle ge en bra visuell översikt av själva ön. Det skulle även vara lättare att sätta in en brytare mellan den nya A-skenan och den gamla. När T1 och T17 flyttas kommer fack 19 respektive fack 22 att bli lediga, ö-nätsbrytaren skulle då kunna placeras i någon av dessa två fack. En kabel skulle då gå från den nya utbyggnadens skena till fack 19/fack 22 på den gamla skenan. Vid eventuell övergång till ö-drift skulle man kunna bryta här och på så sätt få den nya utbyggnaden som ett ö-nät. Nackdelen med denna konfiguration är att nya fack behöver köpas in och installeras.

Ett annat alternativ är att placera ön som Figur 27 visar. Även detta förslag skulle ge en visuellt bra översikt på ön och bortkopplingen från parallell drift sker i detta fall från fack 13. Denna lösning skulle vara den mest ekonomiskt gynnsamma lösningen då ej alltför stora omorganisationer behöver ske och de nya kabeldragningarna skulle då ske smidigt. Dock begränsas en eventuell utbyggnad av ön redan här då det helt enkelt inte finns någon plats för ytterligare fack. All försörjning av laster i ö-drift skulle i detta fall endast kunna ske via T1 och T17.



Figur 27. Ett annat exempel på hur mellanspänningsställverkets konfiguration skulle kunna se ut.

4.3 Simulering av ö-drift utan reglering

Huvuddelen i denna rapport utgörs av de resultat som erhålls från simuleringar för olika belastningsfall. Utifrån dessa resultat kan viktiga parametrar studeras och slutsatser om konfigurationens lämplighet dras.

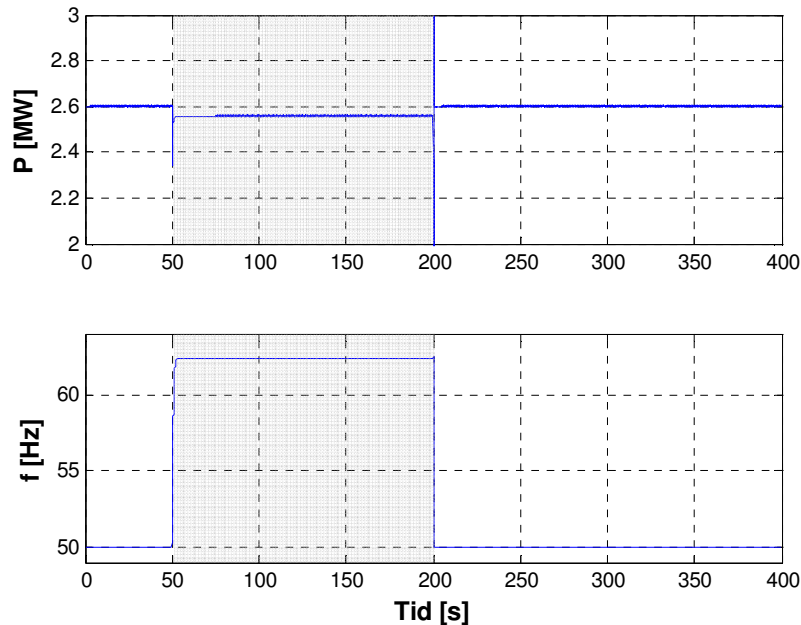
I denna simulering har systemet som visas i Figur 22 använts men utan något reglersystem. Brytaren i fack 13, som länkar samman den nya utbyggnaden av A-skenan och det resterande systemet, har öppnats manuellt vid 50 s och stängts vid 200 s. Under denna tid arbetar generatoren i ö-drift vilket symboliseras som ett skuggat område genomgående i alla figurer med resultat från simuleringarna.

De värden som erhålls i detta kapitel har ingen väsentlig betydelse för det slutgiltiga resultatet, utan det har försökts att uppnå en känsla för hur systemet skulle svara vid omslag till ö-drift utan reglering.

4.3.1 Manuell inkoppling till 1.6 MW ö-nät

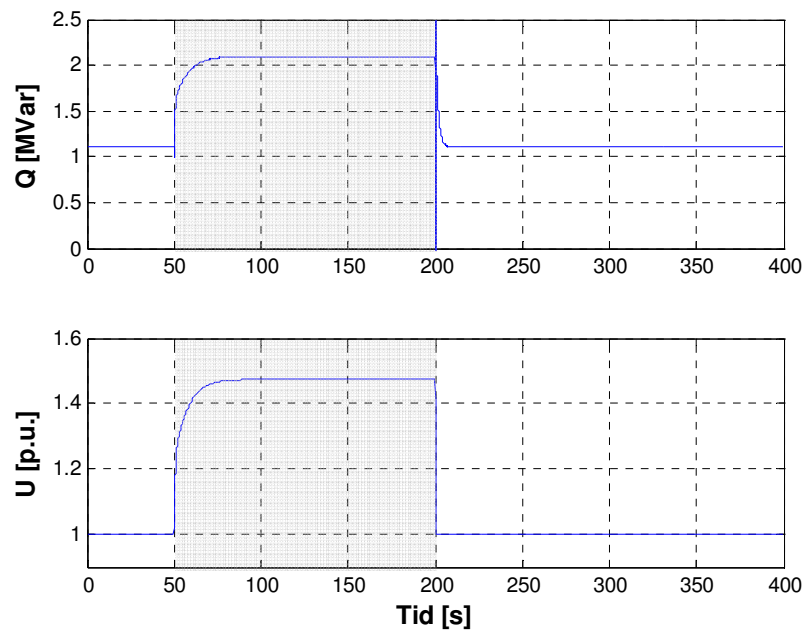
Skulle generatoren behöva gå ner med 1.0 MW på kort tid blir konsekvenserna utan reglering mycket påtagliga. I Figur 28 åskådliggörs den aktiva effekten samt frekvensen när ö-nätet är belastat med 1.6 MW. Utan reglering kommer generatoren ej att anpassa sig till de nya förutsättningarna vid omslag till ö-drift och kommer att fortsätta producera den

aktiva effekt som den är inställd på. Till följd av detta kommer frekvensen i ön att öka ända upp till 65 Hz. Motorerna kommer att konsumera mer aktiv effekt och således kommer de att gå upp i varvtal. Vid omslaget tillbaka till parallell drift upplevs en kraftig oscillation, därefter återgår generatorn till sin märkeffekt. Troligtvis kommer motorernas skydd att lösa ut och systemet kommer att falla.



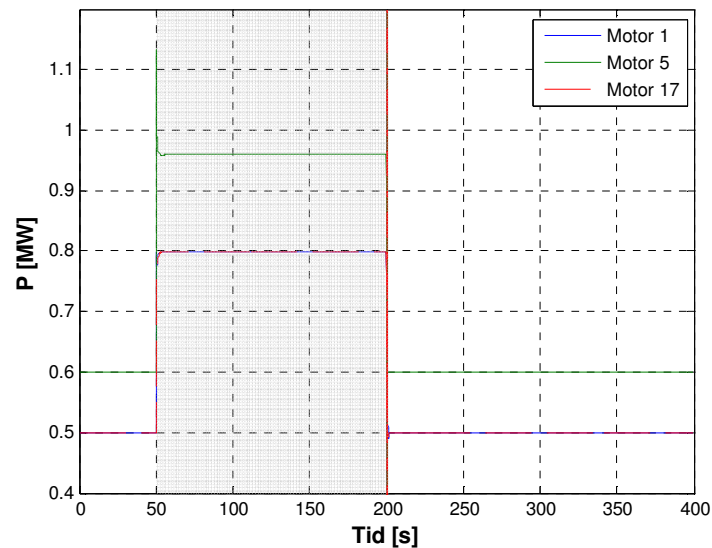
Figur 28. Teoretiskt beräknad aktiva effekt producerad av generatorn och dess frekvens när effektuttaget ligger på 1.6 MW i ö-nätet utan reglering.

Liknande tendenser går att åskådliggöra när spänningsnivån på A-skenan analyseras. Vid omslaget till ö-drift kommer generatorn att öka sin produktion av reaktiv effekt. Eftersom detta är mer än vad motorerna behöver kommer spänningen att öka. Detta kan beskådas i Figur 29, där spänningen ökat med ca 50 %. Troligen kommer denna spänning att bli lägre i praktiken eftersom mättning i transformatorer och motorer ej betraktats i simuleringsprogrammet.



Figur 29. Spänning och producerad reaktiv effekt från generatoren när effektuttaget ligger på 1.6 MW i ö-nätet utan reglering.

När frekvensen ökar så kraftigt som den gör i detta fall rusar samtidigt motorerna i ö-nätet upp och konsumerar då ännu mer aktiv effekt. Figur 30 illustrerar hur mycket effekten i varje aggregerad motor ökar under ö-drift.



Figur 30. Den aktiva effekten konsumerad av de tre aggregerade motorer som finns i ö-nätet utan reglering och med en effekt på 1.6 MW i ö-nätet.

4.4 Reglersystem

Simuleringarna i föregående kapitel motiverar en implementering av ett reglersystem till generatoren. Då det kan infinna sig en osäkerhet över när systemet kan återgå till parallell drift vill man sträva efter att ha en så optimal drift som möjligt under ö-drift. Med optimal drift menas att frekvensen och spänningen i ö-nätet ligger inom samma tillåtna intervall som under parallell drift. En vanlig uppsättning av reglersystem för att styra en synkrongenerator består av följande komponenter:

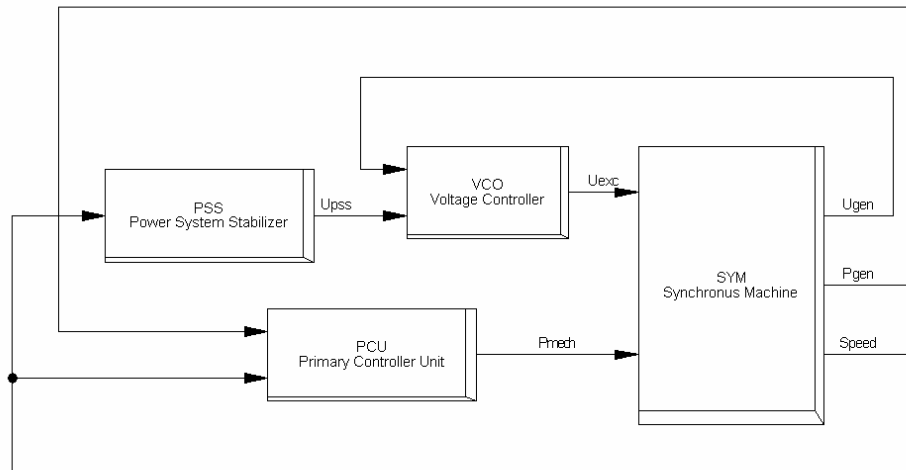
- Primary Controller Unit (PCU)
- Voltage Controller (VCO)
- Power System Stabilizer (PSS)

PCUn kontrollerar drivkraften från turbinen till generatoren. Detta i sin tur leder till en reglerad aktiv effekt och således en reglerad elektrisk frekvens.

VCO:n reglerar den reaktiva effekt som generatoren skall producera/absorbera genom att variera den matade spänningen till generatorns rotorlindningar, och således variera det producerade magnetfältet.

I ett stort ihopkopplat elsystem förekommer det hundra till tusen olika svängningsfrekvenser, d.v.s. sinusoidala avvikelser från den nominella elektriska frekvensen. De mest intressanta i stabilitetssammanhang ligger i spannet 0.8 - 2.0 Hz [A5]. För att motverka dessa rotoroscilleringar i generatoren används en PSS. Detta åstadkoms genom att som indata ha skillnaden i rotorns varvtal och som utdata ge en signal till generatorns rotorlindningar, som i sin tur ger ett moment som då motarbetar oscilleringar. Något som bör nämnas är att även andra parametrar kan användas som indata till PSS, så som frekvens vid generatorterminalen och effekt [B2].

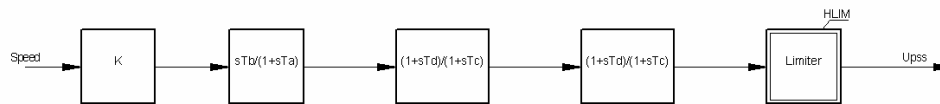
Dessa tre komponenter har använts i detta projekt och Figur 31 ger en översiktsbild på hur detta ser ut när man kopplar dem samman. Här åskådliggörs hur de tre kontrollerna hänger ihop och hur signalerna går in och ut från synkrongeneratoren.



Figur 31. Översiktsbild över det reglersystem som använts i simuleringarna.

Blocken i Figur 31 innehåller i sin tur information med ett flertal parametrar som beror på kontrollegenskaper, komponentdata etc.

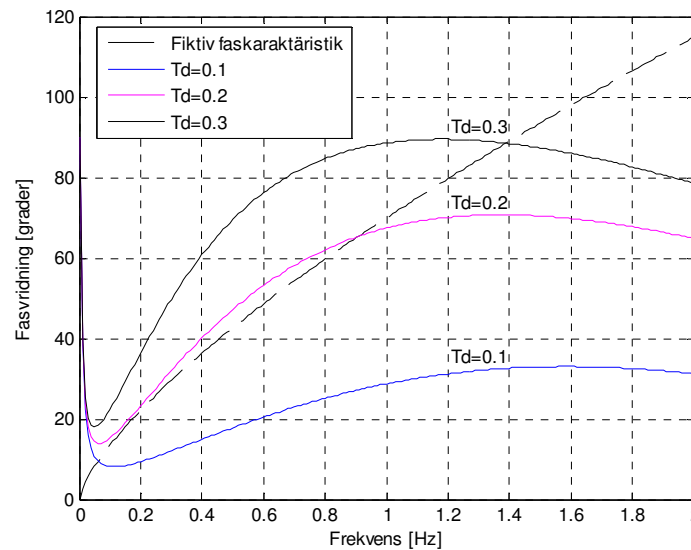
I Figur 32 beskrivs en PSS i detalj. Det första blocket är ett block som kan efterlikna en ren förstärkning K . Förstärkningen bestämmer den totala dämpningen introducerad av PSSn. Block två är av högpasskaraktär och motiveras av att det endast finns intresse av signaler som är associerade till oscillationer. Detta är väldigt viktigt då annars en permanent ändring i frekvens (det som sker i ö-drift) skulle leda till ett konstant fel i spänningen på generatorns terminal. Det tredje och fjärde blocket är av samma karaktär och har som uppgift att kompensera för den fasskillnad som existerar mellan magnetiseringskretsens ingång och det elektriska momentet. Alltså, för att PSSn skall ha fungerande funktion måste den producera ett elektriskt moment i fas med de oscilleringar som skall dämpas. Sist implementeras ett block vars effekt är att motverka alltför höga fluktuationer i spänningen som kan uppstå vid transienta förlopp [A5]. Figur 33 visar hur det erhålls olika fasvridningar med avseende på parametern T_d . I figuren har även en fiktiv faskaraktäristik för systemet lagts till. Denna karaktäristik är inte från ÅB, utan har tagits fram för att på ett pedagogiskt sätt illustrera PSSns funktion. För att erhålla en optimal dämpning vid 0.91 Hz skall T_d vara inställd på 0.2. Figuren visar även att PSSn kompenserar bra i området 0.1–1.0 Hz för denna inställning.



Figur 32. Power system stabilizer

Tabell 17. Parametervärden för använd PSS.

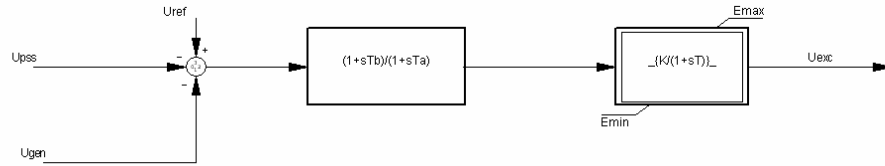
K [p.u.]	Ta [s]	Tb [s]	Tc [s]	Td [s]	$HLIM$ [p.u.]
1	20	20	0.05	0.1	0.05



Figur 33. Fasvridningen mellan 0-3.5 Hz för olika värden på Td .

VCOs uppbyggnad åskådliggörs i Figur 34 och har som indata referensspänning, generatorspänning samt den spänningskomponent som erhålls från PSSn (se Figur 32). Referensspänningen sätts i början av simuleringen till generatorspänningen i stationärt tillstånd och behåller sedan detta värde genom hela simuleringen. Det första blocket som signalen går igenom kallas för "Transient Gain Reduction" (TGR) och har ungefär samma funktion som PSSn har, alltså att dämpa oscilleringar. I vissa fall kan det vara tillräckligt att enbart implementera en TGR och helt utesluta en PSS. Signalen går sedan vidare till ett block med en förstärkning och en lågpassskäraktär. Detta block innehåller

även en begränsning för att motverka att alltför höga spänningar inträffar på fältlindningarna [B2]. Tabell 18 visar de valda parametervärdena.

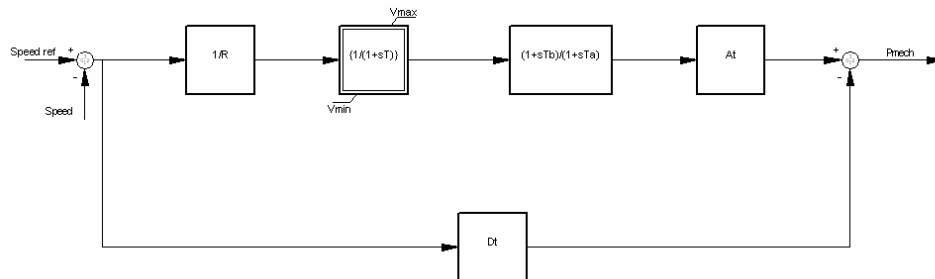


Figur 34. Voltage controller.

Tabell 18. Parametervärden för VCO.

K [p.u.]	T [s]	Ta [s]	Tb [s]	E_{max} [p.u.]	E_{min} [p.u.]
400	1	5.68	1000	3.85	0

PCUn används till att styra drivkraften till generatoren och på så sätt styra frekvensen i systemet. Varvtalet från generatoren subtraheras först med varvtalsreferensen, som sätts till generatorns varvtal i stationärt tillstånd. Det första blocket i Figur 35 står för hur systemet svarar vid en ändring i aktiv effekt beträffande systemfrekvensen. Detta block kan även beskrivas som den totala reglerstyrkan man vill introducera i systemet. Därefter följer ett block som är av karaktären lågpasfilter för att blockera transienter. Det tredje blocket beskriver turbinens dynamiska egenskaper. Slutligen går turbinens effektkoefficient (A_t) in i ett summationsblock som subtraherar denna signal med friktionsförlusterna i turbinen (D_t) [B2]. De parametervärden som valts för PCUn kan ses i Tabell 19.



Figur 35. Primary controller unit.

Tabell 19. Parametervärden för PCU.

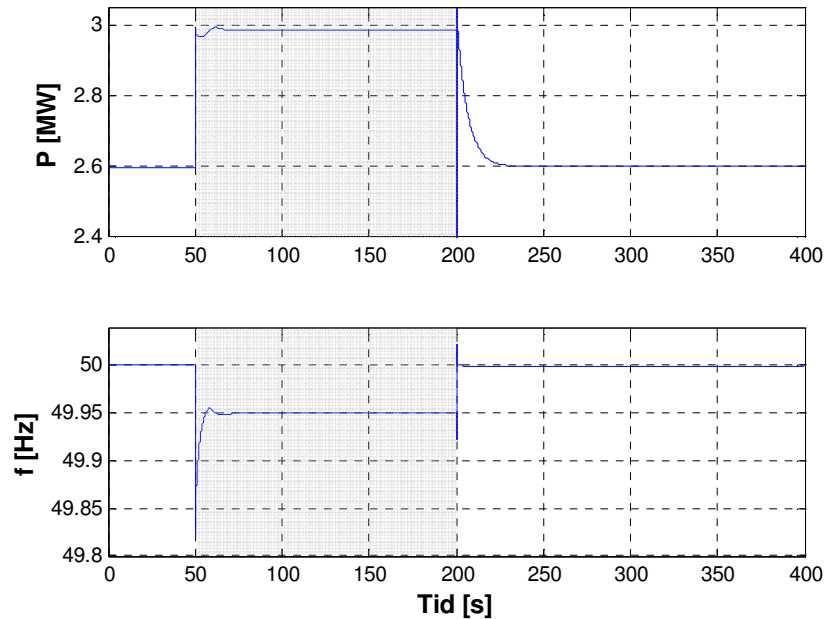
R [p.u.]	T [s]	$V_{\max}$ [p.u.]	$V_{\min}$ [p.u.]	T_a [s]	T_b [s]	A_t [p.u.]	D_t [p.u.]
0.008	0.015	5	0	6	2	1.215	0.1

4.5 Simulering med reglering av extremfall

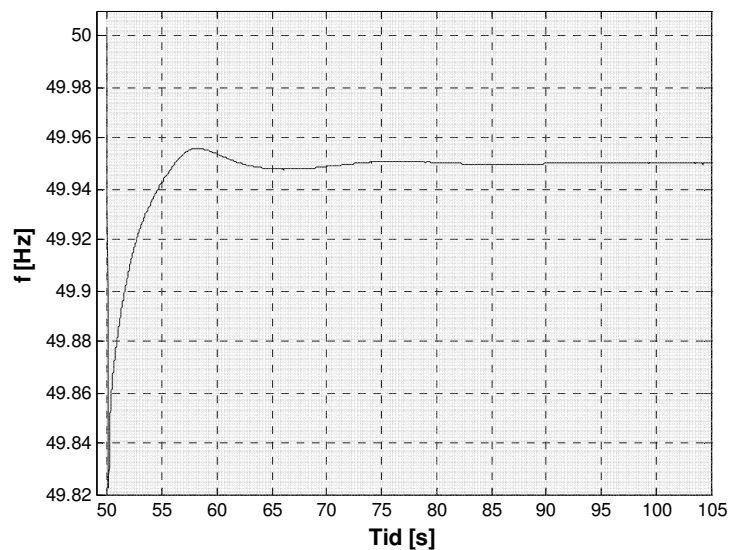
I följande simuleringar har ett reglersystem använts och olika sätt att gå in i ö-drift har praktiserats. Reglersystemet har implementerats för att visa hur stor vikt ett reglersystem har i dessa sammanhang. Samma nät och tillvägagångssätt som i det oreglerade fallet har använts. Två olika sätt att gå in i ö-drift har simulerats; ena fallet när åska ligger i luften och driftansvarig manuellt kopplar in ö-drift, andra fallet då det externa nätet fallerar och ö-drift kopplas in per automatik.

4.5.1 Manuell inkoppling till 3.0 MW ö-nät

I detta fall har samma konfiguration använts som i fallet utan reglering, men nu har ett reglersystem lagts till med parametrar från Tabell 17 - Tabell 19. På samma sätt som i det oreglerade systemet har brytaren i fack 13 öppnats manuellt vid 50 s för att sedan stängas igen vid 200 s. Ö-nätet konsumerar nu 3.0 MW, vilket medför att generatorn överbelastas med 0.4 MW vid omslaget till ö-drift. Figur 36 visar att frekvensen sjunker till 49.8 Hz som lägst under ö-drift. En mer detaljerad bild över hur frekvensen ser ut vid övergången till ö-drift finns att beskåda i Figur 37. Den svänger här in sig till den nya frekvensen i ö-nätet som kommer att ligga på 49.95 Hz. När systemet återgår till parallell drift vid 200 s upplevs en lite större oscillering i den aktiva effekten och det tar sedan upp mot 20 s för den aktiva effekten att nå sitt nominella värde, vilket beror på att det externa nätet har en mycket större reglerstyrka. Frekvensen stabiliserar sig sedan mycket snabbt och tangerar sitt nominella värde efter någon millisekund.



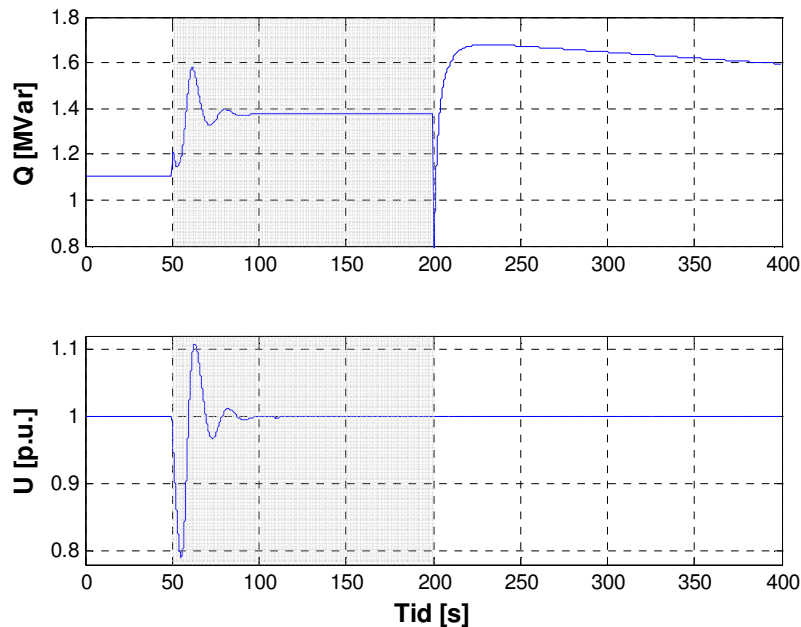
Figur 36. Teoretiskt beräknad aktiva effekt producerad av generatoren och dess frekvens när effektuttaget ligger på 3.0 MW i ö-nätet.



Figur 37. Generators frekvens vid inkoppling av ö-drift.

Spänningsökningen för det reglerade systemet blir nu 10 % som högst och 20 % som lägst när systemet går in i parallell drift. Det tar ca 40 s för spänningen att återgå till sitt nominella värde, vilket kan jämföras med det oreglerade systemet som aldrig fick tillbaka sin nominella spänning under ö-drift. Då det finns (som tidigare nämnts) ett samband

mellan spänning och reaktiv effekt kommer den senare också att ändras i detta fall. Som Figur 38 visar ökar den reaktiva effekten när systemet går in i ö-drift. När systemet sedan återvänder till parallell drift tar det relativt lång tid för den reaktiva effekten att nå sitt nominella värde. Detta sker p.g.a. att det externa nätet nu hjälper till med spänningsreglering och tillför extern reaktiv effekt vilket begränsar produktionen av reaktiv effekt från generatoren.

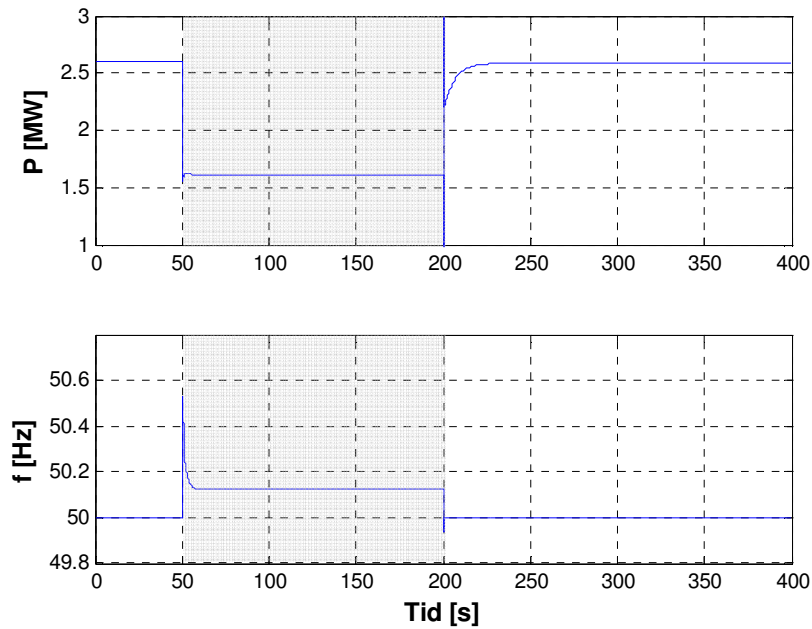


Figur 38. Spänning och producerad reaktiv effekt från generatoren när effektuttaget ligger på 3.0 MW i ö-nätet.

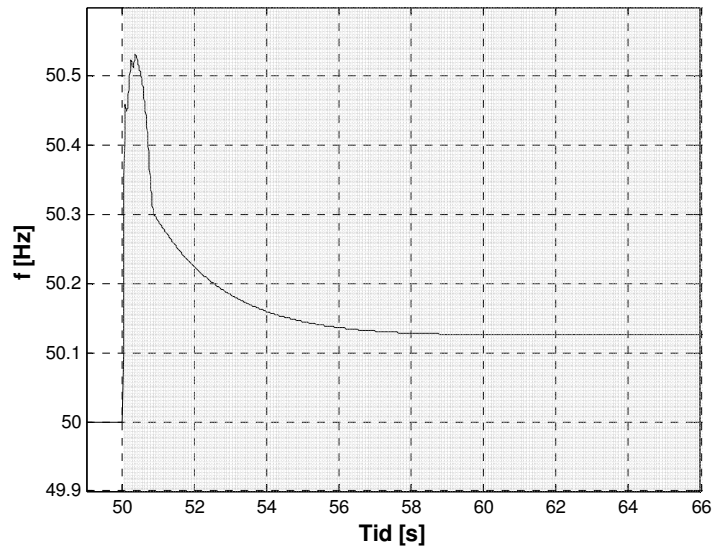
4.5.2 Manuell inkoppling till 1.6 MW ö-nät

I Figur 39 - Figur 41 presenteras det nästkommande fallet där ett effekttapp om 1 MW simulerats. Samma tillvägagångssätt som i Kapitel 4.5.1 har använts för själva simuleringen och reglerparametrarna i systemet är oförändrade. När nu ö-nätets konsumerade effekt ligger på 1.4 MW lägre än i föregående simulering kommer frekvensen att öka. Detta bekräftas i Figur 39 där man ser att frekvensen lyckas stabilisera sig på 50.1 Hz, vilket får anses vara överkomligt. En viss översläng i frekvensen fås direkt i ingången till ö-drift vilket åskådliggörs i Figur 40. Här antar frekvensen ett maxvärde på en bit över 50.5 Hz, men detta sker enbart under några sekunder och den svänger sedan in sig tämligen snabbt på ö-nätets nya frekvens. Den aktiva effekten oscillerar på ett liknande sätt som i föregående fall och även här tar det ca 20 s för den att

tangera sitt nominella värde. Inträdet i ö-drift sker momentant och stabiliserar sig relativt omgående på 1.65 MW. Ökningen med 0.05 MW jämfört med effektuttaget i ö-nätet beror på att motorerna konsumerar mer aktiv effekt under ö-driften, detta p.g.a. att frekvensen ökar.

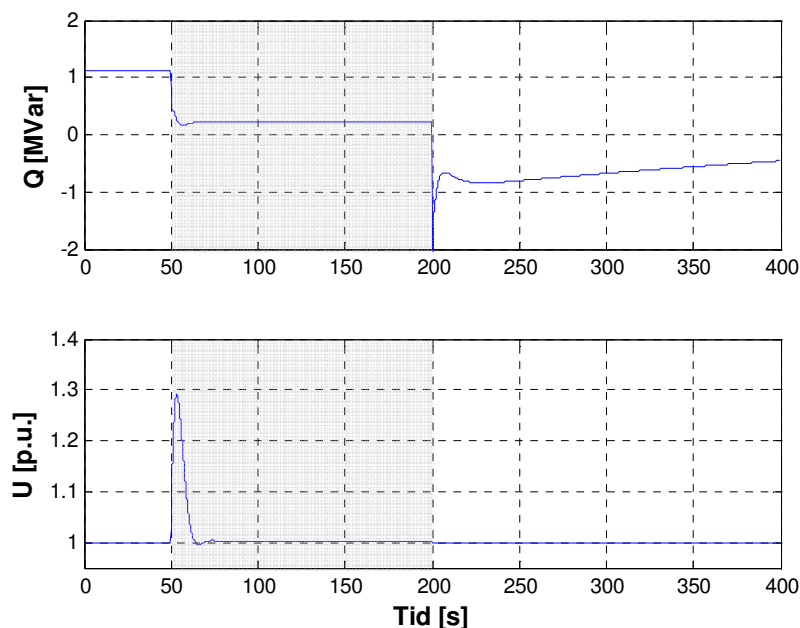


Figur 39. Generators producerade aktiva effekt och dess frekvens när effektuttaget ligger på 1.6 MW i ö-nätet.



Figur 40. Generators frekvens vid inkoppling av ö-drift.

När generatoren nu tappar 1.4 MW mer än i fallet som beskrivs i Kapitel 4.5.1 kommer självklart spänningsökningen bli större. Istället för 10 % blir nu ökningen 30 %, detta är dock inget jämfört med det oreglerade systemet där ökningen var nästan 50 %. Dessa värden får anses vara rimliga jämfört med den effekt som tappas. På samma sätt som i föregående fall tangerar inte den reaktiva effekten sitt nominella värde under simuleringstiden och detta beror även i detta fall på det externa nätets spänningsreglering.

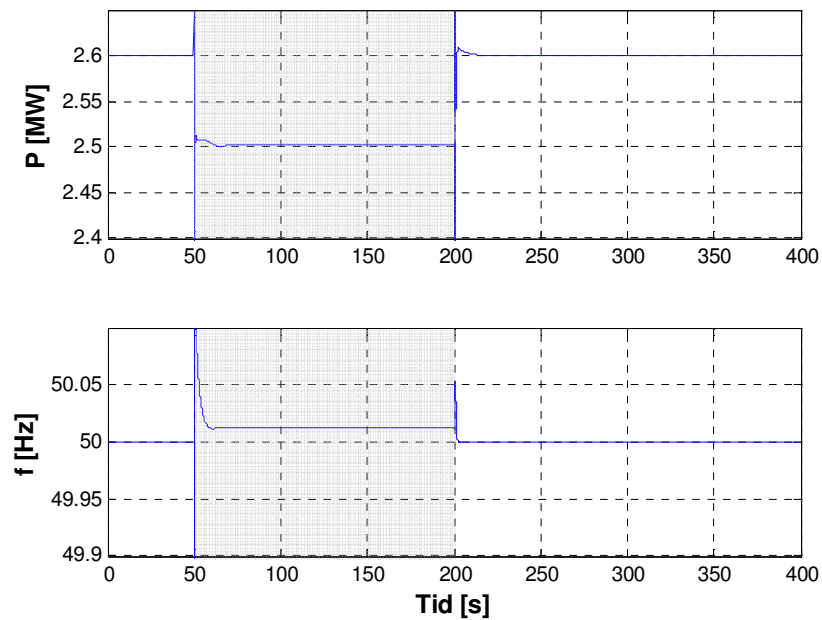


Figur 41. Spänning och producerad reaktiv effekt från generatoren när effektuttaget ligger på 1.6 MW i ö-nätet.

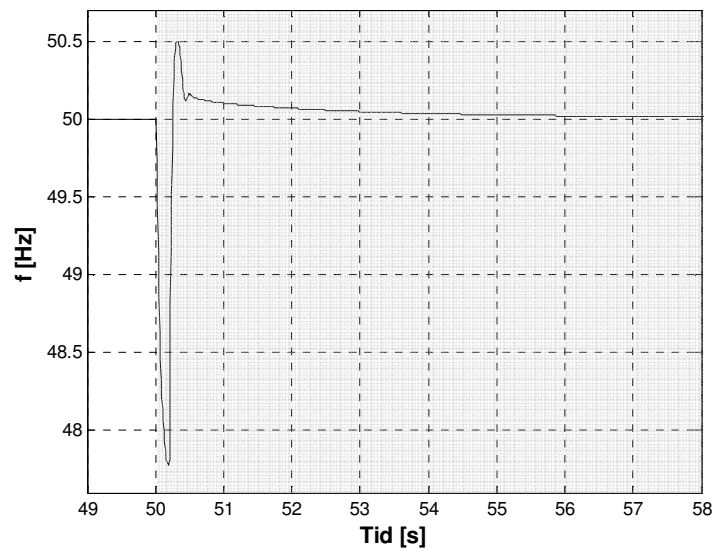
4.5.3 Automatisk inkoppling till 2.5 MW ö-nät

Ett tänkbart scenario som kan uppstå är att pappersbruket blir spänningslöst utan förvarning. Detta skulle kunna tänkas uppstå vid komponentfel i något ställverk, eller att åskan slår ut nätet innan man beslutat att koppla in ö-drift. Det skulle även kunna vara ett kortslutningsfel i närliggande bebyggelse som tillfälligt sänker spänningsnivån. Om detta skulle ske bör ö-nätet kopplas in per automatik så snabbt som möjligt, dock ej snabbare än att transienter på nätet får gå obemärkt förbi. I följande simuleringar har ett tidsintervall på 200 ms lagts till när det externa nätet slås ifrån. 200 ms kan symboliseras med den tid som ett kortslutningsfel i närliggande omgivning tillåts pågå innan säkringen slår ut.

En analys av frekvensen presenteras i Figur 42 och Figur 43. Här ses även att generatoren, efter att i 0.2 s försökt försörja hela effektförbrukningen i ÅB på egen hand, lyckas komma tillbaka och anpassa sig till de nya förhållandena, d.v.s. 50 Hz efter några sekunder. Frekvensen sjunker drastiskt till ca 48 Hz under den tid då generatoren får arbeta själv, men återhämtar sig bra och hamnar slutligen på 50.01 Hz.

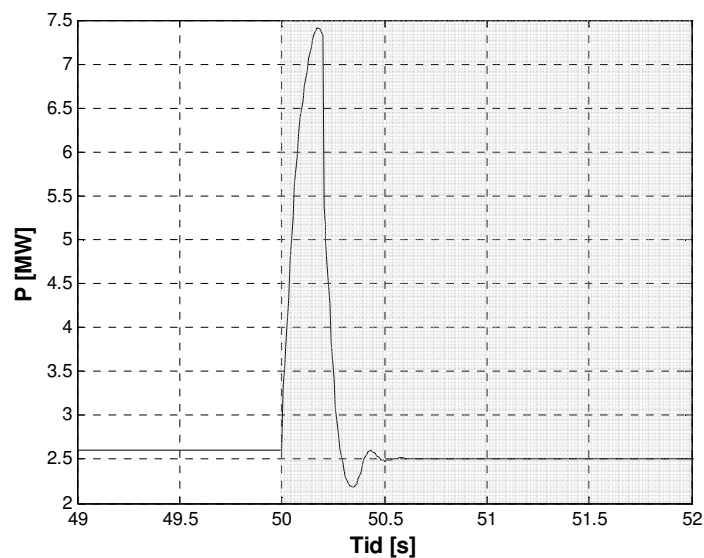


Figur 42. Generators producerade aktiva effekt och dess frekvens när effektuttaget ligger på 2.5 MW i ö-nätet.



Figur 43. Generatorns frekvens under tidsintervallet vid spänningslöst nät och ö-drift.

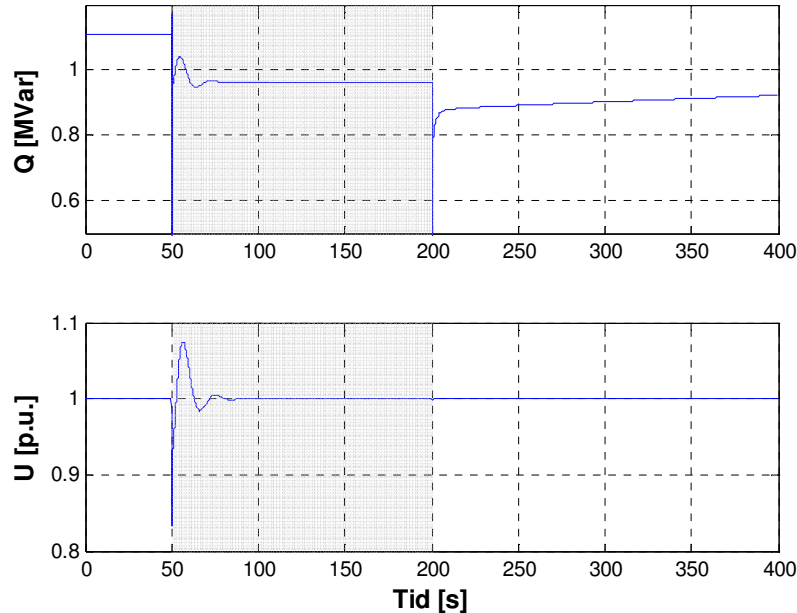
Noterbart är även att generatorm försöker försörja totala effektbehovet (Figur 44) genom att gå upp i effekt. Den klarar att gå upp i 7.5 MW innan den går in i ö-drift. Ett längre avbrott utan ö-drift skulle troligtvis leda till att generatorm kopplas bort från nätet och pappersbruket skulle tappa all elektrisk försörjning.



Figur 44. Generatorns producerade aktiva effekt mellan parallell drift och ö-drift.

Precis som för frekvensen klarar sig spänningen inom rimliga gränser. Efter att ha fått utstå 200 ms utan det externa nätets spänning hämtar sig generatorm. Efter en översläng

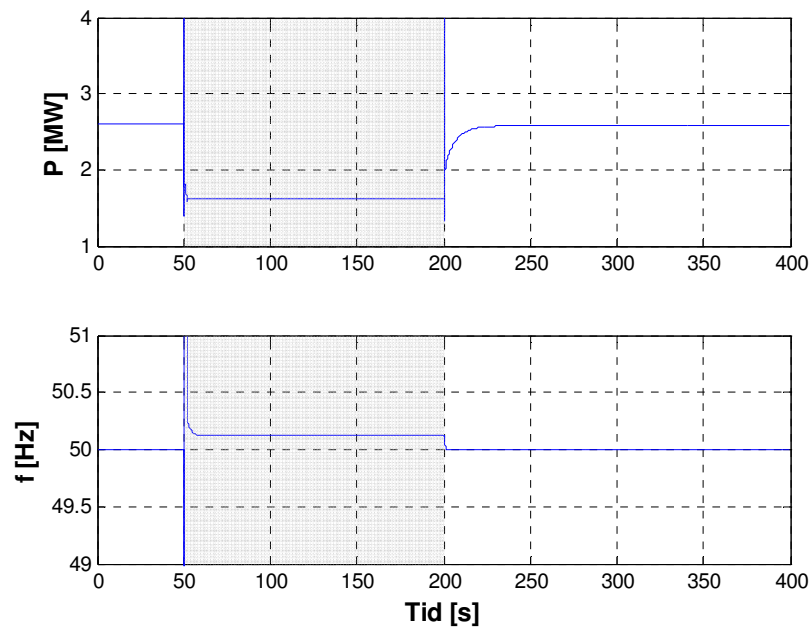
på 1.1 p.u. landar spänningen på 1 p.u. igen efter ungefär 30 s som Figur 45 visar. När det externa nätet försvinner upplever också systemet en spänningsdipp på 85 % av den nominella spänningen.



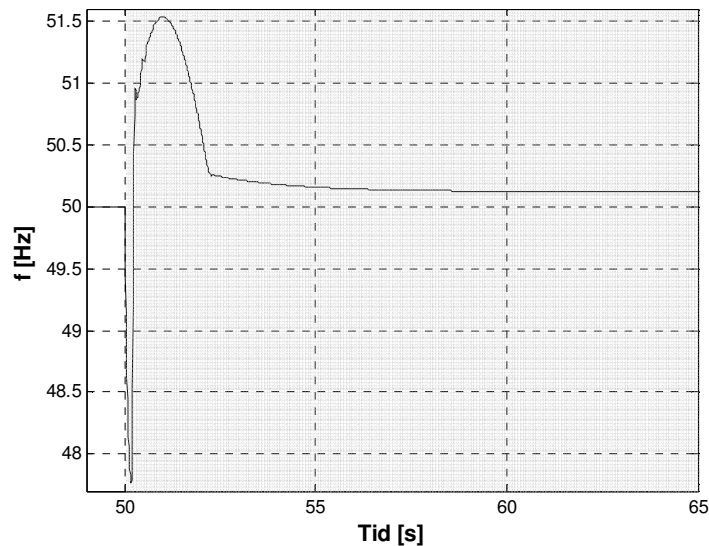
Figur 45. Spänning och producerad reaktiv effekt från generatören när effektuttaget ligger på 2.5 MW i ö-nätet.

4.5.4 Automatisk inkoppling till 1.6 MW ö-nät

I nästkommande simulering, vilken får antas vara den tuffast tänkbara situationen som kan uppstå i pappersbruket, upplevs ett 200 ms långt strömavbrott innan brytaren slår till och ett ö-nät på 1.6 MW försörjs. Figur 46 presenterar erhållen frekvens och aktiv effekt, där strömavbrottet sker vid 50 s och brytaren i fack 13 öppnas 200 ms senare. Generatören anpassar sig bra till de nya förhållandena och efter en liten transient i början stabiliserar den sig på önskad effekt. Frekvensen följer den aktiva effekten och landar på 50.2 Hz, vilket även detta får anses vara ett överkomligt resultat. Det kritiska tidsintervallet vid 50 s har undersökts lite mer noggrant (Figur 47) med avseende på frekvensen. Här syns tydligare att generatören, som under 200 ms behöver försörja hela elkonsumtionen i pappersbruket, sjunker i frekvens men klarar av att svänga in sig på en stabil frekvens på ca 15 s då brytaren slår till och isolerar ön.



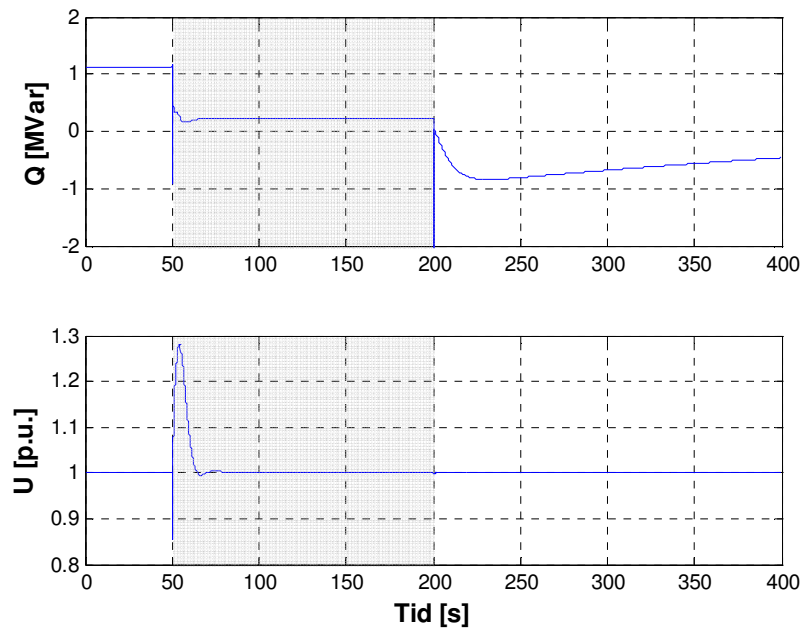
Figur 46. Generators producerade aktiva effekt och dess frekvens när ett effektuttag på 1.6 MW förekommer i ö-nätet.



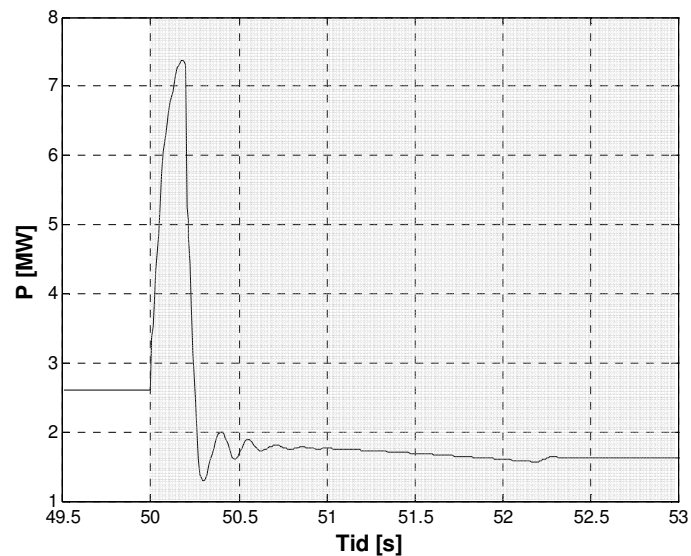
Figur 47. Generators frekvens under tidsintervallet vid spänningslöst nät och en bit in i ö-drift.

Spänningsnivån hålls inom rimliga gränser och den reaktiva effekten likaså. Figur 48 bekräftar detta, samtidigt som det kan observeras att den reaktiva effekten vid tillbakagång till parallell drift ej går tillbaka till nominellt värde. Detta då det externa nätet kommer in och reglerar spänningen till 1 p.u. med extern reaktiv effekt. Dock

kommer generatorns produktion av reaktiv effekt att öka successivt under en lång period och slutligen nå upp till nominell effekt. Figur 49 visar på samma sätt som i föregående simulering hur den aktiva effekten försöker försörja det totala effektbehovet och rusar upp till 7.5 MW under 200 ms. Den aktiva effekten svänger sedan in sig och når sitt nominella värde efter 3 s.



Figur 48. Spänning och producerad reaktiv effekt från generatoren när effektuttaget ligger på 1.6 MW i ö-nätet.



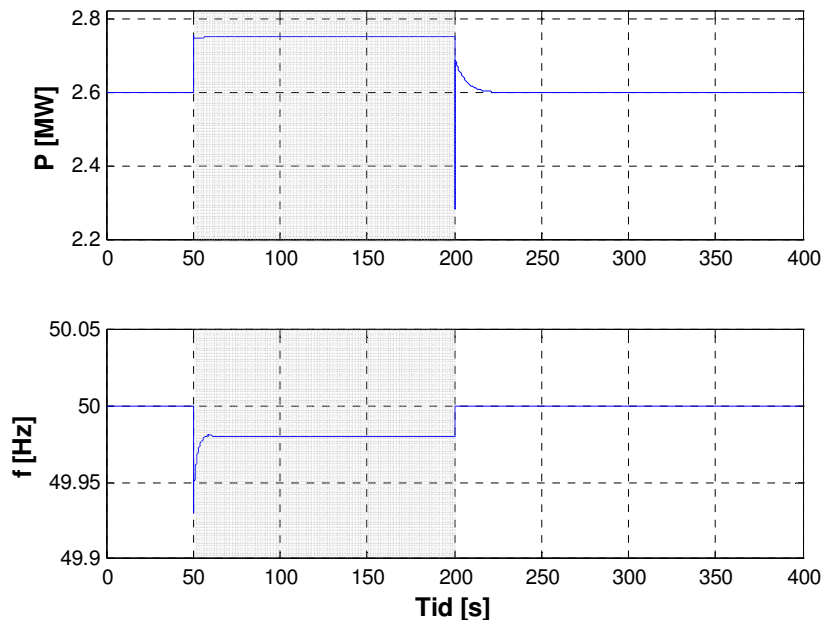
Figur 49. Generatorns producerade aktiva effekt mellan parallell drift och ö-drift.

4.6 Simulering av föreslagen ö-nätskonfiguration

På samma sätt som extremfallen simulerades har den föreslagna effekten (se Kapitel 4.2.2) simulerats. Den manuella inkopplingen sker nu med en effekt på 2.76 MW och den automatiska med en effekt på 1.87 MW i ö-nätet.

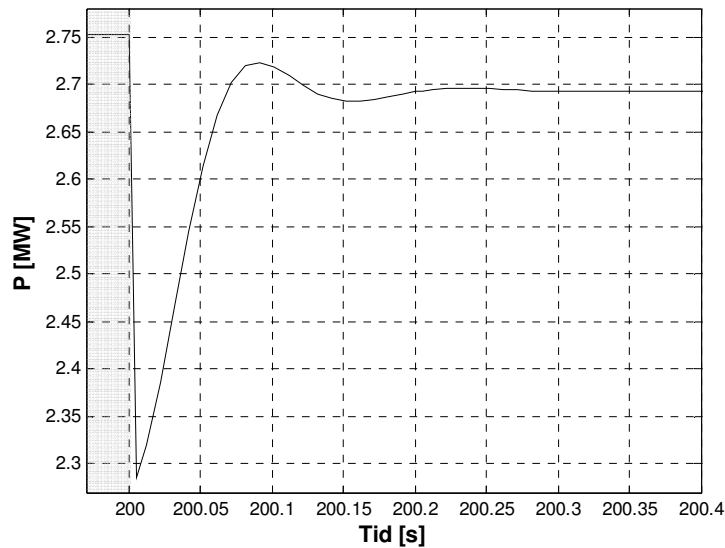
4.6.1 Manuell inkoppling till 2.76 MW ö-nät

Den mest praktiska lösningen för manuell inkoppling är att ej koppla om drifter, utan att bevara alla de drifter som finns på respektive transformator. Samtidigt vill man kunna driva de laster som finns i ön på ett optimalt sätt så att inte konflikter uppstår mellan de olika mekaniska delarna i produktionen. I följande simulering har T1, T5 och T17 simulerats som en ö tillsammans med generatoren. När ö-nätet kopplas in manuellt för den önskade effekten kommer generatoren överbelastas med 0.16 MW. Detta innebär att frekvensen i ö-nätet kommer att sjunka, vilket illustreras i Figur 50. Den nya frekvensen i ö-nätet kommer nu att ligga på 49.98 Hz, vilket är ett rimligt resultat. När parallell drift sedan infinner sig efter 200 s återfås den nominella frekvensen momentant till skillnad från den aktiva effekten. Som visas i Figur 50 tar det ca 20 s för den aktiva effekten att tangera sitt nominella värde, vilket kan förklaras på samma sätt som i föregående simuleringar (se Kapitel 4.5.1).



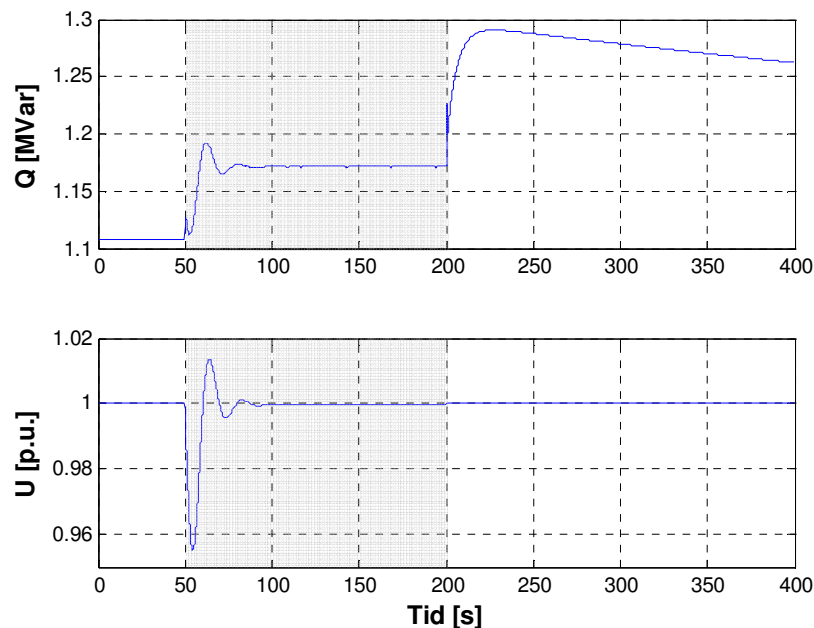
Figur 50. Generatorns producerade aktiva effekt och dess frekvens när effektuttaget ligger på 2.76 MW i ö-nätet.

I Figur 51 illustreras urkopplingen av ö-drift och ingången i parallell drift för den aktiva effekten. Insvängningsförloppet visas här i detalj och den aktiva effekten sjunker till 2.3 MW för att snabbt ta sig upp till 2.7 MW. Det tar sedan ett tiotal sekunder innan den har nått sitt nominella värde.



Figur 51. Den aktiva effekten producerad av generatoren vid urkoppling av ö-drift.

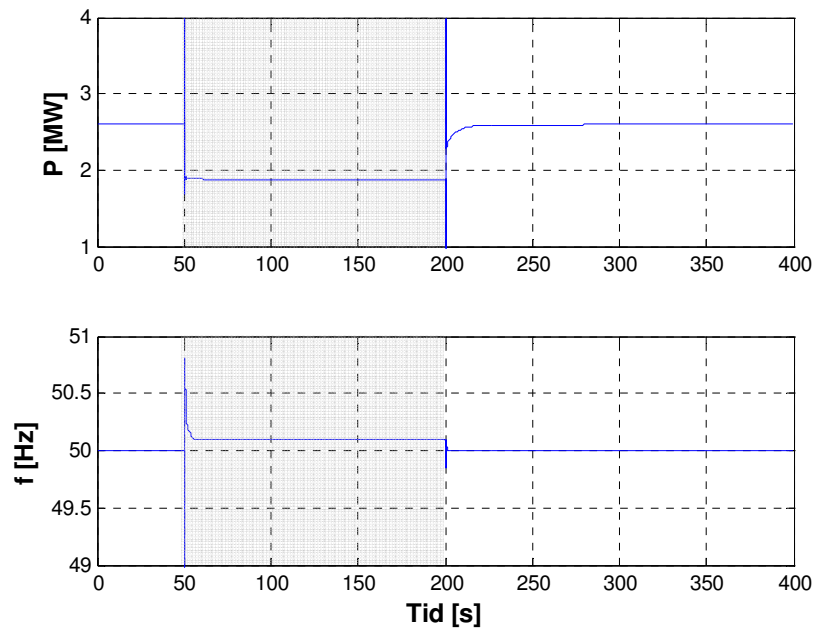
På grund av att generatoren producerar en effekt över sin märkeffekt kommer spänningen i ön att sjunka (se Figur 52). Detta sker i en kortare period och efter ett tiotal sekunders ö-drift har spänningen svängt in sig och ligger då på 1 p.u. Under denna insvängning upplever också ön en ökad spänning, men denna ligger enbart på 1 % vilket får ses som en relativt liten ökning i sammanhanget. Den reaktiva effekten kommer med anledning av den spänningsdipp som uppträder i systemet att öka under ö-drift. När parallell drift infinner sig ökar den lite till för att sedan sakteliga återgå till sitt nominella värde. Detta aningen långsamma insvängningsförlopp förklaras på samma sätt som i Kapitel 4.5.1.



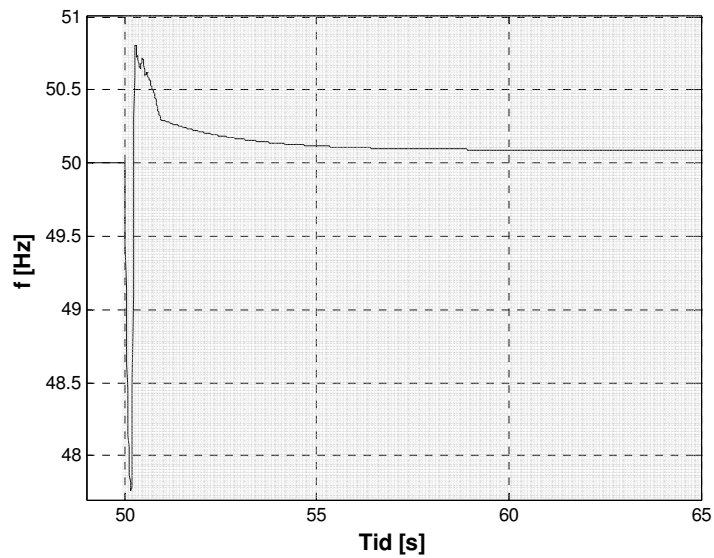
Figur 52. Spänning och producerad reaktiv effekt från generatoren när effektuttaget ligger på 2.76 MW i ö-nätet.

4.6.2 Automatisk inkoppling till 1.87 MW ö-nät

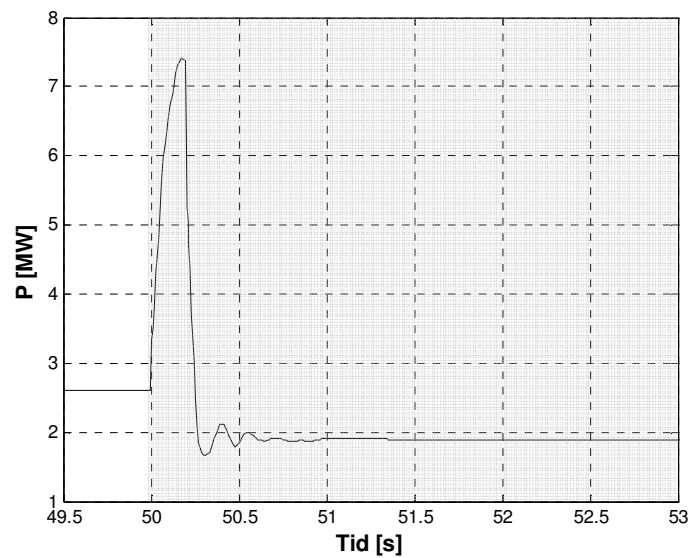
Den effekt som behöver genereras i ön vid automatisk inkoppling har tagits fram i Kapitel 4.2.2.1 och är 1.87 MW. Generatoren kommer då att gå ner i effekt med 0.73 MW vilket medför en ökad frekvens i ö-nätet. Enligt Figur 53 blir den nya frekvensen i ö-nätet 50.1 Hz när den stabiliserats sig. När det externa nätet försvinner erhålls en relativt låg frekvens på 47.9 Hz vilket illustreras i Figur 54. När ö-nätsbrytaren kopplar ifrån efter 200 ms upplevs en frekvenstopp på 50.8 Hz, men detta sker enbart i ett fåtal sekunder. På samma sätt som i tidigare simuleringar kommer den aktiva effekten att kraftigt oscillera vid inkoppling och urkoppling av ö-drift. När generatoren själv försöker försörja pappersbruket kommer dess produktion av aktiv effekt att öka kraftigt för att sedan avta relativt snabbt (Figur 55). Även i denna simulering observeras att det tar några sekunder för effekten att återgå till sitt nominella värde.



Figur 53. Generatorns producerade aktiva effekt och dess frekvens när ett effektuttag på 1.87 MW förekommer i ö-nätet.

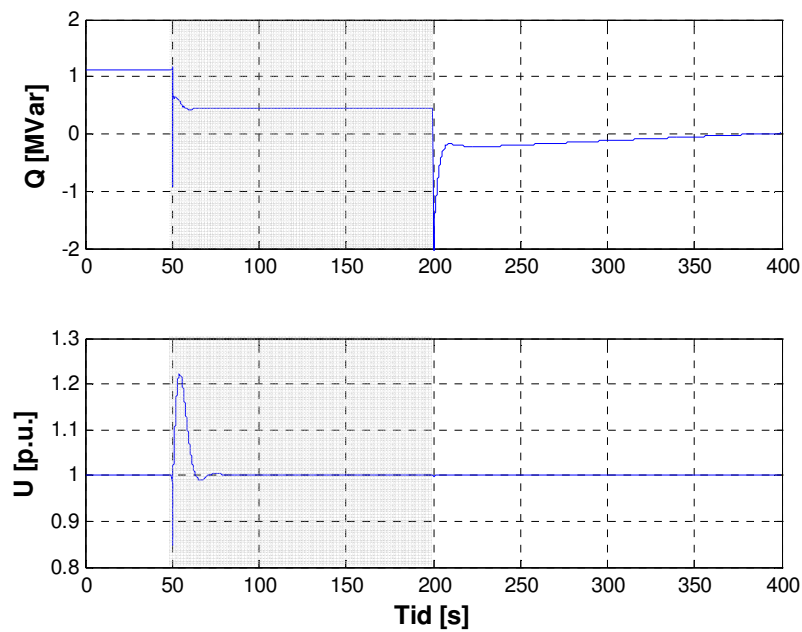


Figur 54. Generatorns frekvens under tidsintervallet vid spänningslöst nät och framåt.

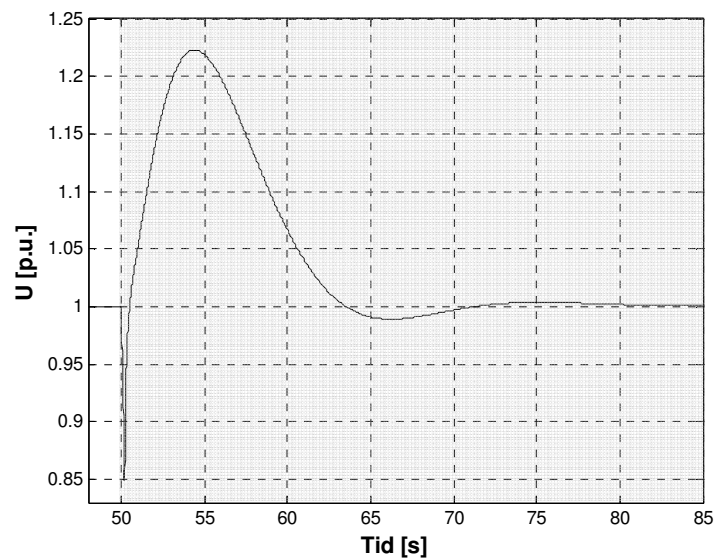


Figur 55. Generatorns producerade aktiva effekt i övergången mellan parallell drift och ö-drift.

Spänningen upplever även den en viss oscillering vid inkopplingen av ö-drift (se Figur 56), men den maximala spänningen överstiger aldrig 20 % av nominellt värde. Figur 57 visar en mer detaljerad bild på hur spänningen ser ut vid ingången till ö-drift. Spänningen sjunker till en nivå på 85 % av sitt nominella värde, men detta sker under en mycket kort period. Den reaktiva effekten uppför sig på samma sätt som i tidigare simuleringar, och i detta fall sjunker den vid inkopplingen till ö-drift. Detta för att kunna bibehålla spänningen.



Figur 56. Spänning och producerad reaktiv effekt från generatorn när effektuttaget ligger på 1.87 MW i ö-nätet.



Figur 57. Spänningen från generatorn vid inkoppling av ö-drift.

5 Slutsatser och diskussion

Detta är en förstudie över hur ÅBs tilltänkta samförbränningsstation är lämpad för att operera i ö-drift. Med stor sannolikhet kommer inte systemet att hamna exakt på de frekvenser eller de spänningar som simulerats fram. Dock har alla antaganden gjorts med stor omsorg varför resultaten bör ge en bra bild över hur det kommer att se ut.

Då många av drifterna på pappersbruket är relativt gamla har det varit svårt att få korrekt information gällande deras effektförbrukning, tröghetsmoment och storlek. Den information som varit till förfogande har oftast varit ganska britsfällig och många antaganden har gjorts. Dessa antaganden är dock gjorda med mycket eftertänksamhet och med hjälp av pålitliga referenser.

Den approximering som gjorts för att sammanfoga alla de motorer anslutna till en transformator som en enhet är en approximation av den enklare sorten. Den viktigaste parametern i dessa sammanhang, tröghetsmomentet, har dock tagits fram på ett sätt som ändå representerar de anslutna motorerna med en rättvis modell. Bättre noggrannhet hade kunnat åstadkommas om alla motorer hade definierats var för sig, som tidigare nämnts i rapporten. Här har även de få likströmsmotorer modulerats som asynkronmotorer eftersom detta annars hade medfört komplikationer i den aggregering som utförts, samt att ur en tröghetssynpunkt är dessa motortyper relativt lika. De mekaniska lasterna som alla motorer driver har antagits ha en kvadratisk momentkaraktäristik som funktion av varvtalet. Detta antagande har gjorts efter att ha utvärderat alla mekaniska lasters karaktäristik, och till slut konstaterat att de flesta mekaniska laster är pumpar eller fläktar, som är av denna karaktär.

I programvaran (DIgSILENT) som alla större simuleringar gjorts i har dessvärre inte samförbränningsstationens egenskaper som kraftslag kunnat definieras. Om det antas att samförbränningsstationen är av typ värmekraftverk har den, som Tabell 2 visar, sämst egenskaper bland de nämnda kraftslagen att reglera aktiv effekt. Därför kommer det krävas generösa begränsningar för styrsignalen till ventilen som släpper på ånga till turbinen för att klara av att driva samförbränningsstationen i ö-drift. Det bör även finnas utrymme att förvara ånga så att pådraget till turbinen kan ske snabbt vid behov.

Reglersystemet i denna rapport är troligen av en mycket enklare variant än det som kommer att användas i praktiken. Alltså kan resultaten som erhållits i denna studie bli bättre rent teoretiskt, i och med att det har visats att ett mycket simpelt styrsystem kan realisera ö-drift i ett system av denna karaktär.

En Power System Stabilizer har presenterats som en integrerad del i generatorns reglersystem. Dock visade det sig att denna inte hade någon större inverkan då systemet (ö-nätet) är väldigt litet. Konsekvenserna kan däremot bli negativa om en alltför hög dämpning introduceras av denna komponent i form av frekvens- och spänningsavvikelser

Reglersystemets parametrar har anpassats för extremfallet med en effekt på 1.6 MW vid automatisk inkoppling. För resterande fall har samma parametrar använts och detta med ett positivt resultat. Då reglersystemet inte är anpassats för alla specifika fall skulle resultaten troligtvis kunna bli något bättre. För att inte behöva byta dessa parametrar vid hastiga förändringar används alltså samma parametrar genomgående i alla fall.

Vid den automatiska inkopplingen till ö-drift upplever generatorn den största påfrestningen. Under 200 ms kommer hela pappersbruket att försörjas av generatorn och denna kommer att gå på maxeffekt. Frekvensen och spänningen i pappersbruket kommer att sjunka till följd av att den aktiva och reaktiva effektproduktionen inte räcker till. Beroende på hur reglerparametrarna är inställda kommer olika storheter att uppföra sig på olika sätt. Om svarstiden för reaktiv effekt är mycket kortare än för aktiv effekt kommer spänningen att regleras med fullt pådrag av reaktiv effekt, vilket begränsar den aktiva effekten som behövs för att upprätthålla frekvensen. Således har en optimal design eftersträvat mellan de olika reglerkomponenterna för att erhålla ett balanserat tillstånd mellan frekvens och spänning.

Diskussioner kan också föras över hur många drifter som skall köras i ö-drift vid en automatisk inkoppling. Möjlighet finns att koppla in fler vakuumpumpar med hjälp av kabel och kontakter som beskrivs i Kapitel 4.2.2.1. Detta skulle då medföra en större effekt i ö-nätet, vilket i sin tur skulle leda till en mindre frekvens- och spänningsökning. Det negativa är dock att det måste dras nya kablar vilket är både dyrt och omständligt att utföra rent praktiskt.

Ett enkelt, dock ekonomiskt tungt förslag är att installera intelligenta ställverk för att slippa flytta drifter från nuvarande position. På så sätt skulle ön kunna definieras även då lasterna är spridda utplacerade i området. Detta skulle även kunna möjliggöra ändringar i systemet utan att behöva koppla om drifter.

Strömmar som uppträder vid in- och urkopplingsförloppet till ö-drift har ej tagits hänsyn till i denna rapport. Eftersom generatoren kommer att rotera med en frekvens som ej är ekvivalent med nätets, kommer denna att tappa synkronisering och således vid inkopplingsförloppet till nätet generera kortslutningsströmmar till följd av skillnaden i faserna. Troligtvis kommer infasningen till nätet att ske per automatik och på så sätt kommer tillslaget att ske då faserna ligger synkront, och således minimera de kortslutningsströmmar som kan tänkas uppstå.

Ingen hänsyn har heller tagits till att selektivitetsordningen, till följd av lägre felströmmar, har ändrats. Eftersom kortslutningseffekten i ön är mycket lägre än den som förekommer i det externa nätet blir alla säkringar feldimensionerade och skulle troligtvis inte lösa ut då ett kortslutningsfel inträffar någonstans i ön.

Att arbeta i ö-drift medför inte bara positiva effekter för ÅBs drifter, utan upprätthåller även en kontinuerlig förbränning av avfall. Om inte samförbränningsstationen vore utrustad för att operera i ö-drift skulle förbränningspannan vara tvungen att stängas ner då det externa nätet blir spänningslöst. Detta skulle medföra problem med förvaringen av det dagliga avfallet som ankommer till ÅB. Det skulle även leda till en uppstartningsprocess av förbränningspannan när det externa nätet kommer tillbaka, vilket medför en konsumtion av extern effekt under denna tid.

Ett vanligt problem som behandlats i andra rapporter är huruvida generatorer i ett ö-nät klarar av att hållas synkrona mot varandra. Anledningen till att det inte lagts någon vikt på detta problem i denna rapport är helt enkelt att det bara finns en generator som producerar effekt i nätet. Om det i framtiden skulle tillkomma en generator till i ö-nätet skulle detta problem behöva behandlas i mer detalj.

En fråga som dykt upp under rapportens gång är hur det skulle kunna se ut om samförbränningsstationen skulle ha möjlighet att producera mer aktiv effekt. Kanske skulle då ÅB kunna vara självförsörjande med endast reservkraft från nätet. Detta skulle helt kunna radera ut de problem som finns vid in- och urkoppling till ö-drift. Pappersbruket skulle kunna drivas i ö-drift året om, eller operera i parallell drift och sälja den el som blir över till externa källor.

Avslutningsvis anses att ÅB skall satsa på att anpassa samförbränningsstationen för ö-drift så att man kan upprätthålla en kontinuerlig förbränning av hushållsavfall och snabbt kunna komma igång med pappersproduktionen efter ett eventuellt strömavbrott.

6 Referenser

Artiklar:

- [A1] R. Caldon, F. Rossetto, R. Turri (2004). *Temporary islanded operation of dispersed generation on distribution networks*. Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International, vol 3, ss 987- 991.
- [A2] J. Jyrinsalo, E. Lakervi (1993). *Planning the islanding scheme of a regional power producer*. Electricity Distribution, 1993. CIRED., 12th International Conference on, vol 4, ss 4.21.1 - 4.21.5.
- [A3] Pedra, Joaquín, Sainz, Luis & Córcoles, Felipe (2005). *Study of Aggregate Models for Squirrel-Cage Induction Motors*. IEEE transactions on power systems, vol 20, ss 1519-1527.
- [A4] Franklin, Dino R. Coinete, França, Andre L. Morelato (1994). *Improving dynamic aggregation of induction motor models*. IEEE transactions on power systems, vol 9, ss 1934-1944.
- [A5] Kundur, Prabhashankar, Klein, Meir, Rogers, Graham & Zywno, Malgorzata S (1989). *Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability*. IEEE transactions on power systems, vol 4, ss 614-626.

Böcker:

- [B1] Dalder, Jaap (2006). *EEK185 Power system design*. Chalmers University of Technology. Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering. Gothenburg.
- [B2] Kundur, Prabhashankar (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.
- [B3] Hallenius, Karl-Erik (1977). *Elektriska maskiner*. Lund: Bröderna Ekstrands Trycker AB.
- [B4] Kiamah, Philip (2003). *Power generation handbook: selection, applications, operation, and maintenance*. New York: McGraw-Hill.
- [B5] Thiringer, Torbjörn (1996). *Measurements and Modelling of Low-Frequency Disturbances in Induction Machines*. Diss. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.
- [B6] Bollen, Math (2000). *Understanding power quality problems : voltage sags and interruptions*. New York: IEEE Press.

Internet:

- [I1] PDF Format. Tillgänglig: < http://www.tps.se/produkter/pdf/referenser/avfallsforbranning/application_report_0905%20_amotfors.pdf> (070904)
- [I2] Tillgänglig: < <http://www.wermlandpaper.se/> > (070702)

- [I3] PDF Format. Tillgänglig: <
[http://www.wermlandpaper.se/energiprojektet/samrådsunderlag\[1\].20060119_id184.pdf](http://www.wermlandpaper.se/energiprojektet/samrådsunderlag[1].20060119_id184.pdf) > (070702)
- [I4] PDF Format. Tillgänglig: <
http://db.s2.chalmers.se/download/masters/master_056_2005.pdf >
(070914)
- [I5] PDF Format. Tillgänglig: <
http://www.energimyndigheten.se/web/biblshop.nsf/FilAtkomst/ER2007_13W.pdf/> (070914)
- [I6] PDF Format. Tillgänglig: <
http://www.energimyndigheten.se/web/biblshop.nsf/FilAtkomst/ER2005_32w.pdf/> (070914)
- [I7] PDF Format. Tillgänglig: <
http://www.svk.se/upload/3320/tfSvKFS2000_1.pdf > (070702)
- [I8] PDF Format. Tillgänglig: <
http://www.solvina.se/internet/ref/Events/Reglermote_2002/Reglering%20av%20kraftverk%20i%20önätdrift-1.0.pdf > (070702)
- [I9] PDF Format. Tillgänglig: <
<http://www.solvina.se/internet/ref/articles/HWIL-simulator.pdf> >
(070702)
- [I10] PDF Format. Tillgänglig: <
[http://www.energimyndigheten.se/web/biblshop.nsf/FilAtkomst/ER2007_13W.pdf/\\$FILE/ER2007_13W.pdf?OpenElement](http://www.energimyndigheten.se/web/biblshop.nsf/FilAtkomst/ER2007_13W.pdf/$FILE/ER2007_13W.pdf?OpenElement) > (070702)
- [I11] PDF Format. Tillgänglig: <
http://www.svk.se/upload/4385/DRADMP_3-06.pdf > (071018)
- [I12] Tillgänglig: < http://www.digsilent.de/Company/About_DIgSILENT/ >
(070702)
- [I13] PDF Format. Tillgänglig: <
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/AE222099516B455DC1257274003C992C/\\$File/1TGC910001B0203%20MNS%20iS%20System%20Guide_CMYK.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/AE222099516B455DC1257274003C992C/$File/1TGC910001B0203%20MNS%20iS%20System%20Guide_CMYK.pdf) > (070917)
- [I14] Tillgänglig: <
<http://www.abb.com/Product/seitp322/0c4b291dbf1c7f37c1256fb700415a70.aspx?productLanguage=se&country=00&tabKey=2> > (070917)
- [I15] PDF Format. Tillgänglig: <
http://www.svk.se/upload/3320/SvKFS2005_2.pdf > (071018)

Bilaga 1 – Mailkonversation

Mail till Richard Perers, ABB AB:

(Tidigare mailkonversation som det hänvisas till i texten är ej medtagen då den inte innehöll någon relevant information)

Hej Richard!

Som beskrivet i mailkonversationen nedan skall generatorvärdena vara för en generator på ca 2.6 MW som körs på 11 kV. Denna skall sedan implementeras i DigSILENT (simuleringsprogram) i ett större system. För att få detta så realistiskt som möjligt då vi inte vet något om generatorer och dess parametrar skulle vi vilja ha värden på:

- Tidskonstanten H
- Mekanisk dämpning
- Statorresistans
- Statorreaktans
- Läckreaktans
- Synkronreaktans
- Sekvensdata (positiv, negativ, noll)

Om du inte har alla dessa parametrar kanske du vet ungefärliga värden.

Tack på förhand

Mvh

Andreas Andersson

Christer Olsson

Hej,

Här kommer exempel på data på en maskin med dina specifikationer.

- Tidskonstanten H 0.74 s
- Mekanisk dämpning 1-1.25%

REAKTANSER (PU)

Xd (unsat/sat) 1.6946 1.5862 (synkronreaktans d-riktning)
Xq (unsat/sat) 0.8420 0.7881 (synkronreaktans q-riktning)
Xl 0.1871 (läckreaktans)
X0 0.0958 (nollföljdsreaktans)
X2 0.3063 (minussföljdreaktans)

RESISTANSER (OHM)

Stator (20°C) 0.16068
" (95°C) 0.20889
Rotor (20°C) 0.03325
" (95°C) 0.04323
R0 (95°C) 0.11910
R1 (95°C) 0.23821
R2 (95°C) 0.33687

Richard Perers

ABB AB

Elmotorgatan 2

Phone: +46 21 329342

email: richard.perers@se.abb.com

Bilaga 2 – Motorer

Här följer alla de motordrifter som finns under respektive transformator efter att ändringar gjorts.

T1	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Färskvattenpump	200 kW, 4-pol	100 % av tiden	180	100
Tryckhöjningspump PM1	22 kW, 4-pol		28	16
Slampump 1	75 kW, 4-pol	100 % av tiden	80	44
Slampump 3	75 kW, 4-pol	Reserv		0
Slampump från cistern	30 kW, 4-pol	75 % av tiden	50	28
Stora upplösaren	160 kW, 4-pol	50 % av tiden	180	100
Massapump stora upplösaren	22 kW, 4-pol	5 % av tiden.	25	14
Lilla upplösaren	75 kW, 4-pol	50 % av tiden	105	58
Deflaker	75 kW, 4-pol	50 % av tiden	80	44
Massapump lilla upplösaren	22 kW, 4-pol	50 % av tiden.	15	8
Omrörare tank	4 kW, 6-pol			0
Slampump från bassäng	15 kW, 4-pol	<5 % av tiden.	22	12
Remsfläkt	30 kW, 4-pol	60 % av tiden.	50	28
Pump injekt renarsteg 2	75 kW, 4-pol		70	39
Pump orent bakvatten	45 kW, 4-pol		65	36
Pump finfraktion Sileri	45 kW, 4-pol		45	25
Bakvatten Fallben	45 kW, 4-pol		40	22
Ventilationsluftfläkt	55 kW, 6-pol		75	42
Torkluftfläkt	45 kW, 2-pol		20	11
Våtluftfläkt	55 kW, 4-pol		50	28
Kvarn 5	315 kW, 8-pol			240
Rejektsil	22 kW, 6-pol		21	12
Brandpump	45 kW	Vid brand	60	0
Kompressor 2	315 kW, 4-pol	100 % av tiden	200	220
Belysning		100 % av tiden	286	66
Totalt				1 191

T2	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Kvarn 1	355 kW, 4-pol			240
Kvarn 2	355 kW, 4-pol			240
Kvarn 3	355 kW, 4-pol			240
Kvarn 4	355 kW, 4-pol			240
Totalt				960

T5	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Tänd-/Stödbrännare 1	1.5 kW			
Tänd-/Stödbrännare 2	1.5 kW			
Oljebrännare Reservoljepanna	1.5 kW			
Förbränningsluft till reservoljepanna	15 kW			
Förbränningsluft till reservoljepanna	55 kW			
Primärluftspjäll	0.18 kW			
Sekundärluftspjäll	0.18 kW			
Fastbränslepanna Mavapump 1	132 kW			
Fastbränslepanna Mavapump 2	132 kW			
reservoljepanna Mavapump 3	37 kW			
reservoljepanna Mavapump 4	37 kW			
Normalinsprutningspump	3 kW			
Kondensatpump 1 efter turbinkond	6 kW			
Kondensatpump 2 efter turbinkond	6 kW			
Kondensatpump 3 PM	7.5 kW			
Kondensatpump 4 PM	7.5 kW			
kondensatpump 5 fr Lt-tank	7.5 kW			
kondensatpump 5 fr Lt-tank	7.5 kW			
Hetvattencirkulationspump 1	15 kW			
Hetvattencirkulationspump 2	15 kW			
Kemikal doseringspump NaCl	0.55 kW			
Kemikal doseringspump NH3	0.55 kW			
Kemikal doseringspump Fosfat	0.55 kW			
Spädvattenpump 1	7.5 kW			
Spädvattenpump 2	7.5 kW			
Tätvattenpump 1	7.5 kW			
Tätvattenpump 2	7.5 kW			
Sotblåsare lans 1	0.75 kW			
Sotblåsare lans 2	0.75 kW			
Sotblåsare lans 3	0.75 kW			
Sotblåsare lans 4	0.75 kW			
Sotblåsare lans 5	0.75 kW			
Sotblåsare lans 6	0.75 kW			
Sotblåsare lans 7	0.75 kW			
Sotblåsare lans 8	0.75 kW			
Sotblåsare lans 9	0.75 kW			
Sotblåsare lans 10	0.75 kW			

Bilaga 2

Ammoniakpump 1	1.5 kW			
Ammoniakpump 2	1.5 kW			
Vattenpump 1 SNCR	7.5 kW			
Vattenpump 2 SNCR	7.5 kW			
Spillvattenpump	1.5 kW			
Oljekylare	1.5 kW			
Pump till kylare hydraulolja				
Hydraulpump Rost 1	30 kW			
Hydraulpump Rost 2	30 kW			
Hydraulpump Rost 3	30 kW			
Primärluft fläkt P5	90 kW			
Prim.luftspjäll Zon 1, P5	0.18 kW			
Prim.luftspjäll Zon 2, P5	0.18 kW			
Prim.luftspjäll Zon 3, P5	0.18 kW			
Prim.luftspjäll Zon 4, P5	0.18 kW			
Prim.luftspjäll Zon 5, P5	0.18 kW			
Prim.luftspjäll Zon 6, P5	0.18 kW			
Sekundärluft fläkt, P5	110 kW			
Sekundärluftspjäll låg fram	0.18 kW			
Sekundärluftspjäll låg bak	0.18 kW			
Sekundärluftspjäll höger sida	0.18 kW			
Sekundärluftspjäll vänster sida	0.18 kW			
Luftspjäll tänd-/stödrännare 1	0.18 kW			
Luftspjäll tänd-/stödrännare 2	0.18 kW			
Rökgasfläkt P5	250 kW			
Recirkulationsfläkt, P5	55 kW			
RG-rec. Spjäll höger sida	0.18 kW			
RG-rec. Spjäll vänster sida	0.18 kW			
Pådragsventil ånga P5	0.37 kW			
Avstägning ånga	0.37 kW			
Avstägning ånga fr P5 till ång ack.	0.37 kW			
Avstägning ånga by-pass turbin	0.37 kW			
Avstägning ånga by-pass turbin	0.37 kW			
Pådragsventil ånga P6	0.37 kW			
Avstägning ånga fr ångack	0.37 kW			
Avstägning ånga efter HT-turbin	0.37 kW			
Avstägning ånga till PM	0.37 kW			
Avstägning ånga till PM	0.37 kW			
Avstägning ånga till kondensor	0.37 kW			
Avstägning ånga efter LT-turbin	0.37 kW			
By-pass pådragsventil ånga	0.37 kW			

Bilaga 2

P5				
By-pass avstägning ånga P5	0.37 kW			
By-pass avstägning ånga ångack	0.37 kW			
By-pass avstägning ånga by-pass turbin	0.37 kW			
By-pass pådragsventil ånga P6	0.37 kW			
Friblåsningsventil LT-ångnät	0.37 kW			
Bränsletravers skåp				
Slaggtravers skåp				
Cellmatare askbehållare motor	1.1 kW			
Asksilo hydrauloljepump	5.5 kW			
Flygaskilosfläktmotor	5.5 kW			
Flygaskilo utmatningsskruv motor	5.5 kW			
Fläkt utsug bil	3 kW			
Våtutmatare slagg	7.5 kW			
Cellmatare ekonomiser	1.1 kW			
Cellmatare multicyklon	1.1 kW			
Cellmatare slangfilter 1	1.1 kW			
Cellmatare slangfilter 2	1.1 kW			
Utmatningsskrapa slangfilter 1	1.1 kW			
Utmatningsskrapa slangfilter 2	1.1 kW			
Transportskruv slanfilter 1	1.1 kW			
Transportskruv slanfilter 2	1.1 kW			
Kalksilo utmatningsskruv motor 1	1.1 kW			
Aktivt kolsilo utmatningsskruv motor 2	1.1 kW			
Cellmatare kalk	1.1 kW			
Cellmatare aktivt kol	1.1 kW			
Transportluftfläkt kalk	5.5 kW			
Transportluftfläkt aktivt kol	5.5 kW			
Kompressor 1	75kW			
Kompressor 2	75kW			
Adsorbtiostork 1	7.5 kW			
Adsorbtiostork 2	7.5 kW			
Centraldammsugare	30 kW			
Pump spillvattentank	2.2 kW			
Vågstation				
LA1 Fläkt 1	37 kW			
LA1 Fläkt 2	15 kW			
LA1 Fläkt 3	15 kW			
LA1 Fläkt 4	15 kW			
Kylmaskin Ställverk	10 kW			
LA1 Matning				

Bilaga 2

LA2	4 kW			
Kylmaskin service byggnad	4 kW			
Pump 1 fjärrvärme extern	15 kW			
Pump 2 fjärrvärme extern	15 kW			
Kvarn	110 kW			
Belysning & Kraft				
Tryckstegringspump WTE	30 kW			
Pump WRD-Olja	4 kW			
Pump WRD-Olja	4 kW			
Sandfilterpump	7.5 kW			
Sandfilterpump	7.5 kW			
Kondensatpump	5.5 kW			
Kondensatpump	5.5 kW			
Oljepump 1	0.37 kW			
Oljepump 2	0.37 kW			
Totalt				600

T8	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Färskvattenpump 7	132 kW, 4-pol	Reserv		
Omrörare 100 m3-kar	55 kW, 6-pol		75	42
Massapump efter 100 m3-kar	55 kW, 4-pol		55	30
Omrörare Träkar	45 kW, 4-pol		48	27
Pump vattentankar upplösare	37 kW, 4-pol		30	17
Bakvattenpump PM 6 uppl.	55 kW, 4-pol		60	33
Bakvattenpump PM 1 uppl.	37 kW, 4-pol		50	28
Pump spädning prop-låda	110 kW, 4-pol	10 % av tiden	120	67
Omrörarpump utskottskar PM 1	45 kW, 4-pol		60	33
Pump fr LF t 100 kbm-kar	22 kW, 4-pol	10 % av tiden	20	11
Pump rejekt fr Biffarsil	18,5 kW, 2-pol	10 % av tiden	18	10
Utskottspump PM 1	30 kW, 4-pol		30	17
Utskottspump PM 6	22 kW, 4-pol		30	17
Bakvattenkar PM 1	37 kW, 4-pol		65	36
Pump bakvattenkar	22 kW, 4-pol		60	33
Pump bakvatten till lilla upplösaren	22 kW, 4-pol	2 % av tiden	35	19
Massapump efter träkar	37 kW, 4-pol		37	21
Massapump silerikar -> PM6	55 kW, 4-pol		60	33
Omrörarpump yttre silerikar	37 kW, 6-pol	Ej i drift	30	17
Algas P7 spritsvatten	15 kW, 2-pol		12	7
Pump P3 Accept fr filter	22 kW, 4-pol		20	11
Algas P6 förfiltrat	22 kW, 4-pol		25	14
Spritsvattenpump	37 kW, 2-pol		25	14
Omrörare inre silerikar	37 kW, 4-pol		30	17

Bilaga 2

Massaomrörare 15 inre silerikar	37 kW, 4-pol		35	19
Guskbrottsurvattnare	15 kW, 6-pol		21,5	12
Biffarsil	90 kW, 6-pol	10 % av tiden	115	64
"Massapump 19" Yttre silerikar -> PM6	22 kW, 4-pol	Ej i drift		0
Massap fr träkar t silerikar	45 kW, 4-pol	< 2 % av tiden.	48	27
Linbladsfilter	4 kW, 4-pol	10 % av tiden	35	19
Utskottspump mellan kar	11 kW, 4-pol	< 2 % av tiden.	20	11
Totalt			704	

T9	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Upplösare maskinsalen	90 kW, 4-pol		10	6
Vacuumpump pick-up	90 kW, 4-pol		150	83
Massapump guskbrott	75 kW, 4-pol		120	67
Pump injekt renarsteg 1	160 kW, 4-pol		230	127
Pump injekt renarsteg 2	55 kW, 4-pol		90	50
Pump renat bakvatten	110 kW, 4-pol		120	67
Massapump rejekttank	15 kW, 4-pol			11
Färskvattenpump vertikal	90 kW, 4-pol	Reserv		
Torkluftfläkt	75 kW, 4-pol		50	28
Skivkvarn 3	315 kW, 8-pol	90 % av tiden.		180
Skivkvarn 4	315 kW, 8-pol			180
Trycksil 2	90 kW, 6-pol		120	67
Omrörare maskinkar 1	37 kW, 4-pol		35	19
Omrörare maskinkar 2	37 kW, 4-pol		35	19
Sekundärsil	37 kW, 4-pol			16
Totalt			919	

T10	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Massapump e upplösare	22 kW, 4-pol		20	11
Vacuumpump gusk 2	160 kW, 4-pol		205	114
Vacuumpump gusk 1	160 kW, 4-pol		200	111
Vacuumpump vira 2	45 kW, 4-pol		50	28
Pump orenat bakvatten	45 kW, 4-pol		65	36
Pump injekt renarsteg 4	15 kW, 4-pol		25	14
Massapump e maskinkar 2	45 kW, 4-pol			24
Massapump e maskinkar 1	45 kW, 4-pol			29
Spädvattenpump	37 kW, 2-pol			13
Ventilationsluftfläkt	55 kW, 6-pol		75	42
Våtluftfläkt	75 kW, 6-pol		95	53
Skivkvarn 1	315 kW, 8-pol			180
Skivkvarn 2	315 kW, 8-pol			180
Omrörare guskgrup	45 kW, 4-pol		20	11

Bilaga 2

Primärsil	55 kW, 4-pol			21
Totalt				865

T14	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Vacuumpump vira 1	45 kW, 4-pol		40	22
Pump mäld till inloppslåda	120 kW		250	110
Pump injekt renarsteg 3	30 kW, 4-pol		50	28
Vacuumpump A	160 kW, 4-pol		220	122
Vacuumpump C	160 kW, 4-pol		200	111
Vacuumpump B	160 kW, 4-pol		220	122
Filttvättump	55 kW, 2-pol		80	44
Tryckhöjningspump färskvatten	45 kW, 4-pol		55	30
Guskvals	133 kW		95	42
Nosvals	143 kW		80	35
Pick-up	110 kW		230	101
2:a press	110 kW		110	48
Torkgrupp 1	66 kW		80	35
Torkgrupp 2	66 kW		45	20
Yankee	133 kW		90	40
Eftertork	111 kW		30	13
Pope	40 kW		55	24
Totalt				948

T17	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Blandarpump övervira	110 kW		190	84
Blandarpump undervira	110 kW		180	79
U-vira guskvals	110 kW		130	57
U-vira nosvals	143 kW		95	42
Ö-vira nosvals	99 kW		70	31
Ö-vira egotteur	99 kW		70	31
Pick-upvals	84 kW		90	40
2:a:press granitvals	39,5 kW		50	22
2:a:press räfflad vals	68 kW		90	40
3:e:press granitvals	39,5 kW		140	62
3:e:press räfflad vals	110 kW		10	4
Torkgrupp 1	68 kW		65	29
Torkgrupp 2	45,5 kW		25	11
Yankee	110 kW		80	35
Torkgrupp 3	45,5 kW		5	2
Hetkalander s-vals	66,1 kW	< 15 % av tiden	100	44
Hetkalander bottenvals	66,1 kW	< 15 % av tiden	100	44
Pope	39,5 kW		45	20
Kompressor 1	150 kW, 8-pol	Reserv	190	

Bilaga 2

Slampump 2	75 kW, 4-pol	Reserv	40	
Brandpump	45 kW	Vid brand	60	
Vacuumpump 079	75 kW, 6-pol		110	61
Vacuumpump 082	160 kW, 4-pol		210	116
Vacuumpump 083	160 kW, 4-pol		200	111
Totalt			964	

T18	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Omrörare maskinkar 1	18,5 kW, 4-pol		12	7
Omrörare maskinkar 2	18,5 kW, 4-pol		12	7
Pump massa fr maskinkar 1	30 kW, 4-pol		41	23
Pump massa fr maskinkar 2	18,5 kW, 4-pol		34	19
Pump injekt Ö-vira	90 kW, 4-pol		110	61
Pump injekt U-vira	110 kW, 4-pol		120	67
Guskgrop pump	37 kW, 4-pol		60	33
Pump fraktionator- splitsvatten	75 kW, 4-pol		60	33
Bakv. - fraktionator	11 kW, 4-pol		60	33
Pump färskv. Filt-vira	75 kW, 2-pol		75	42
Vacuumpump 076	55 kW, 4-pol		70	39
Vacuumpump 078	55 kW, 4-pol		30	17
Vacuumpump 080	75 kW, 6-pol		120	67
Vacuumpump 081	160 kW, 4-pol		240	133
Trycksil u inloppslåda	55 kW, 6-pol		25	14
Trycksil ö inloppslåda	55 kW, 6-pol		25	14
Primärsil	55 kW, 4-pol		85	47
Totalt			655	

T19	Motordata	Drift	Ström [A]	Effektförbrukning [kW]
Upplösare U1 bulk	200 kW, 6-pol		246	136
Upplösare U2 bal	200 kW, 6-pol		190	105
Massapump P1 efter U1	55 kW, 4-pol		97	54
Massapump P2 efter U2	55 kW, 4-pol		97	54
Skruv markficka	28 kW		10 - 60	26
Hydraulaggregat stokrar	30 kW, 4-pol		33	18
Vertikalskruv	22 kW, 4-pol		37	21
Skruv efter vertikalskruv	7,5 kW, 4-pol		16	9
Skruv före U1 fram-back	7,5 kW, 4-pol		10	6
Skruv U2	16,7 kW		30	14
Totalt			444	