

Möjligheterna att balansera vindkraftens variationer

Av Lennart Söder, 25 januari 2010

Syftet med detta dokument är att ge en översikt över de utmaningar som kan uppkomma då en större mängd vindkraft ska integreras i ett kraftsystem. Syftet har varit att inte gå in för mycket på alla detaljer eftersom texten i så fall skulle bli alldeles för lång. Problematiken är till viss del generell, men många av beskrivningarna är mest relevanta för det svenska elsystemet. Detta dokument är baserat på hittillsvarande kunskap och studier som är kända av författaren vid publiceringsdatumet. De värderingar som görs och de slutsatser som dras är författarens egna. Detta dokument kommer att uppdateras när ny information kommer in. Den som har kommentarer och idéer till förbättringar kan gärna skicka dessa till lennart.soder@ee.kth.se.

1 Om balans mellan produktion och konsumtion

El kan i princip inte lagras. Detta innebär att så fort som el konsumeras så måste den produceras och även tvärtom, dvs så fort som den produceras så måste den konsumeras. Detta gäller alltid och är en fysisk grundlag som man inte kan göra någonting åt. Detta innebär i praktiken att så fort som man tänder en lampa så måste denna el produceras någonstans. På motsvarande sätt så gäller det att exakt samtidigt som el produceras i ett vindkraftverk eller vattenkraftverk (eller något annat kraftverk) så konsumeras det någonstans. El kan alltså inte "försvinna"! Det finns fysiskt sett vare sig "elöverskott", eller "elbrist". Det finns förstås alltid en viss mängd förluster i ett elsystem, men dessa är normalt ett par procent (i Sverige ca 10%)

Faktaruta 1:

För varje sekund, minut, år, eller annan tidsperiod gäller alltid att:

[Total elproduktion] =
[Total elkonsumtion] +
[alla förluster i elnäten]

av konsumtionen om man ser hela kedjan från produktion i kraftverk via ledningar ända till konsument. Förlusterna består av att kraftledningar och transformatorer värms upp något när man skickar ström genom dessa. Detta innebär i praktiken att den totala produktionen (= vad generatorerna matar in på elnätet) alltid blir högre än vad konsumenterna tar ut från elnätet. Ibland används orden "elbrist" och "elöverskott". Men dessa ord är snarare ekonomiska beteckningar. "Elbrist" betyder att någon *skulle vilja*

konsumera el, men den finns just då inte tillgänglig där konsumenten finns eller till det pris som konsumenten vill betala. "Elöverskott" innebär på motsvarande sätt att det finns kraftverk som *skulle kunna* producera el om det fanns konsumenter som var beredda att konsumera mer om de ville betala vad elen kostar. Det är självfallet en utmaning i elsystemet att upprätthålla en exakt balans mellan produktion och total konsumtion inklusive förluster i elnäten. Den största utmaningen i det svenska och nordiska elnätet är när man av någon anledning får ett snabbstopp i ett kärnkraftverk. När detta händer (vilket sker ungefär en gång per år i varje kärnkraftverk) så försvinner momentant en elproduktion om ungefär 1000 MW, vilket är elproduktionen i ett större kärnkraftverk. Precis när detta händer så måste alla elkonsumenter fortsätta att få sin el som vanligt, dvs de kan inte längre få sin el från kärnkraftverket utan istället från någon annan energikälla! Den energikälla som då alltid står i "reserv" är att alla generatorer (i vattenkraftverk, kärnkraftverk och andra) i hela det nordiska elsystemet står och snurrar. Precis när kärnkraftverket snabbstoppas så kommer energin istället från den upplagrade energin i alla dessa snurrande generatorer.

Ett sätt att förklara hur balansen upprätthålls i ett elsystem är att dra en parallell med en cykel.

<h3 style="text-align: center;">Cykel</h3> 	<h3 style="text-align: center;">Elsystem</h3> 
<p>Vi utgår från att några på cykeln trampar och några bromsar. Luftmotstånd och hjulmotstånd är "förluster" och en del av bromsandet. Om man på hela cykeln trampar lika mycket som man bromsar så går cykeln med en konstant hastighet.</p>	<p>Detta motsvarar att man i elsystemet (till exempel hela det Nordiska elsystemet vilket visas i figuren) har samma totala produktion som konsumtion. Denna balans innebär att alla större generatorer (med så kallade synkrongeneratorer där den elektriska frekvensen är direkt kopplad till hur fort generatorn snurrar) snurrar lika fort och man har en konstant frekvens i hela elsystemet. Den är normalt 50 Hz, dvs växelspanningen byter polaritet från plus till minus exakt 50 gånger per sekund.</p>
<p>Om nu någon på cykeln plötsligt slutar trampa för att han får ont i benet så börjar cykeln sakta in. Den stannar inte direkt eftersom det finns en viss tröghet i cykeln som beror på vikten hos alla personer och på själva cykeln.</p>	<p>Detta motsvaras av ett något kraftverk plötsligt stannar. Då börjar elsystemet gå lite "långsammare" och frekvensen sjunker något. Den börjar sjunka direkt på samma sätt som cykeln direkt börjar sakta in. Men frekvensen sjunker inte sprängvis eftersom det finns en viss mängd rörelseenergi i turbiner mm vilka driver generatorerna.</p>
<p>När hastigheten på cykeln minskar (samma hastighet på hela cykeln) så finns det några av de som trampar som har en hastighetsmätare. När de ser att hastigheten minskar så kan de trampa mer för att kompensera för den som fick ont i benet. När övriga cyklister ökat sin kraft på pedalerna så mycket att hastigheten är konstant, så har det blivit balans mellan trampare och bromsare.</p>	<p>Detta motsvaras av att det på flera kraftverk, i Norden, framför allt vattenkraftverk, finns frekvensmätare där den elektriska frekvensen mäts kontinuerligt (samma i hela Nordiska elsystemet). När frekvensen minskar så ökas elproduktionen i dessa kraftverk ända tills produktionen ökat så mycket så att den tidigare minskade produktionen i ett kraftverk kompenseras. När detta skett är frekvensen åter stabil. Allt detta sker helt automatisk oavsett vad som orsakat obalansen: havererat kraftverk, vinden minskar i något kraftverk, någon ökar sin elkonsumtion, någon startar ett kraftverk etc. Därefter startas lämpliga kraftverk upp genom manuell reglering så att den automatiska reserven återställs.</p>

I ett stort elsystem som det nordiska är det viktigt att man beaktar överföringsbegränsningar så att inte ledningar överbelastas när variation i ett område kompenseras med ändringar i ett annat område. På cykeln kan kedjan gå av om alla längst fram cyklar och alla andra bromsar.

2 Om reglering och reserver

Det finns flera utmaningar vad gäller hanteringen av elsystem med stor mängd vindkraft. Den övergripande generella utmaningen är att upprätthålla den kontinuerliga balansen på ett ekonomiskt och tillförlitligt sätt med minimal miljöpåverkan. Inom denna ram finns det två viktiga specialfall som ofta diskuteras. Huvudutmaningen U1 och de två viktiga specialfallen U2-U3 är:

U1. Hantering av den kontinuerliga balanshållningen. Utmaningen med den kontinuerliga balanshållningen är att styrbar produktion och konsumtion måste kunna upprätthålla balansen i alla tidsskalor. Med större mängder vindkraft blir det större osäkerheter eftersom vindkraftsprognoser har betydligt sämre noggrannhet än motsvarande elförbrukningsprognoser. En viktig fråga för ekonomisk drift är också vilken verkningsgrad som erhålls hos kraftverken om de måste hållas beredda för ändringar i produktionsnivån. Den kontinuerliga balanshållningen gäller såväl teknisk kapacitet att öka annan produktion när vindkraften minskar, som att minska annan produktion på ett ekonomiskt effektivt sätt när vindkraften ökar.

U2. Låg vindkraftproduktion och hög elförbrukning. Dessa situationer är dimensionerande för hur mycket kapacitet som behöver installeras. Frågeställningen brukar kallas "effektbalansfrågan". Utmaningen idag är att det relativt sällan, vart 5:e eller vart 10:e år kan bli mycket hög elförbrukning. Samtidigt kan det vara hög elförbrukning i våra grannländer vilket minskar möjligheten till import. Med mycket vindkraft kommer samma situation att fortsätta att existera, men inte bara konsumtionsnivån, utan även den varierande vindkraften kommer ha betydelse. Om man studerar historiska situationer i Sverige med hög elförbrukning så finns det såväl situationer med hög produktion i vindkraften som situationer med lite vindkraft. Vid dimensioneringen av elsystemet, för att kunna klara dessa situationer på ett rationellt sätt måste därmed vindkraftsproduktionen i såväl Sverige som i grannländerna vid hög elförbrukning beaktas.

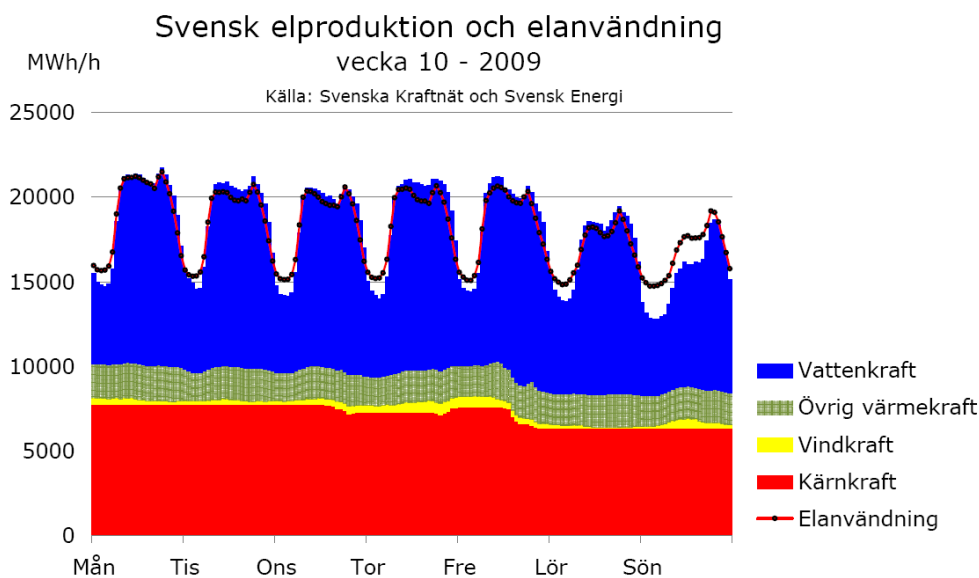
U3. Hög vindkraftsproduktion och låg elförbrukning. Dessa situationer kan hanteras på många olika sätt men har en mycket väsentlig betydelse för hur systemet bör dimensioneras. Om man tillför stora mängder vindkraft till ett område utan att ändra på någonting annat så kan konsekvensen bli, t ex mycket låga priser och/eller att vatten måste spillas förbi turbinerna och/eller att all producerad vindkraft inte kan användas..Det gäller därmed att man uppskattar hur vanlig denna typ av situationer kan förväntas bli och anpassar sina planer efter detta.

Upplägget nedan är att beskriva dessa utmaningar mer detaljerat. Den mest komplicerade utmaningen (att förklara) är U1, hanteringen av kontinuerlig balanshållning. U2 är framför allt viktig för systemsäkerheten, dvs att man klarar av att upprätthålla en tillförlitlig balans även då det inte blåser.

2.1 Hantering av den kontinuerliga balanshållningen – reglerkapacitet

I ett elsystem krävs att produktionen alltid är lika med konsumtionen. Eftersom konsumtionen varierar måste även produktionen variera på samma sätt. Upplägget här är att definiera de kraftverk som kontinuerligt följer elförbrukningen som *reglerkapacitet*. I praktiken är detta många kraftverk eftersom skillnaden i förbrukning mellan dag och natt kan vara flera tusen MW. Med *elförbrukning* menas här den nettoförbrukning som ska täckas av de kraftverk där produktionen styrs för just detta ändamål. I ett första skede betraktas här vindkraften som ”negativ elförbrukning”, dvs de övriga kraftverken ska täcka nettoförbrukningen = skillnaden mellan verklig elförbrukning och vindkraftens produktion.

I figuren nedan visas en kontinuerlig kurva som beskriver den elförbrukning som ska täckas kontinuerligt av styrbar elproduktion dvs *reglerkapaciteten*.



Figur 1: Elproduktion och elkonsumtion i Sverige under vecka 10, 2009. Skillnaden mellan produktion och konsumtion avser elhandel med grannländer. Elförbrukningsändring under veckan varierar kontinuerligt och måste täckas med styrbar produktion

Figuren visar ett exempel på hur nettoförbrukningen varierar kontinuerligt. Denna är hela tiden exakt lika stor som produktionen, vilken därmed måste variera. Några fenomen kan här noteras:

- När nettoförbrukningen är på den lägsta nivån kan den bara öka. Detta beror då på att förbrukningen ökar och/eller att vindkraften minskar. Vid denna nivå är den reglerbara produktionen också på en låg nivå, vilket medför att det finns flera kraftverk som har marginaler till att öka sin produktion. I praktiken vet man dock inte när man har lägst produktion så även då måste man ha beredskap att minska produktionen.
- Utmaningen är framför allt när konsumtionen = produktionen ökar. Det är alltid tekniskt möjligt att *minska* produktionen i den takt man önskar, men det kan i vissa fall leda till energiförluster om man t ex måste dumpa ånga eller spilla vatten. För att *öka* produktionen kan det i vissa elsystem finnas begränsning i hur snabbt detta kan gå. Utmaningen är framför allt stor i system med värmekraft, t ex kolkraftverk, eftersom dessa behöver tid för att värmas upp och kan ha en begränsning i pådragshastighet i MW/minut. Vattenkraft kan ofta gå från stillastående till full produktion på kort tid, 5-10 minuter, men exakt hur kort beror på många olika faktorer

så som exempelvis vattentillgång, villkor enligt vattendomar, det aktuella driftläget och tekniska lösningar för den enskilda anläggningen.

2.1.1 Marknadshantering

Den fysiska hanteringen innebär att det kontinuerligt upprätthålls en balans mellan produktion och konsumtion. I varje area, t ex Sverige eller del av Sverige, upprätthålls också denna balans men då måste man beakta den överföring som kontinuerligt sker med angränsande områden.

Organisatoriskt så sker detta genom att producenter och konsumenter försöker *handla sig i balans*, dvs producenter försöker sälja sin förmodade produktion och konsumenter försöker köpa sin förmodade konsumtion. Genom det så kallade *balansansvaret* så får de ett ekonomiskt incitament att planera sin produktion, konsumtion och handel så väl som möjligt. När inte prognosen stämmer med verkligheten (för produktion eller konsumtion) så kan aktörerna försöka förändra sin handel om de kan uppskatta prognosfelen i förväg. I de fall de inte klarar detta så är det den systemansvariges uppgift att se till att den fysiska balansen upprätthålls. Marknadsaktörerna får sedan betala för sina obalanser.

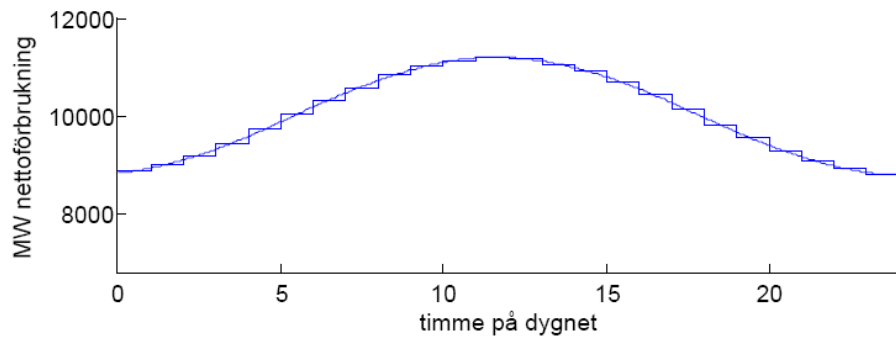
I Sverige är elmarknaden för närvarande uppbyggd på så sätt att olika marknadsaktörer (köpare och säljare) lägger bud för produktion och konsumtion för hela timmar (MWh/h) i olika delar av Sverige. I dagsläget hanteras Sverige som ett område vid bud till Nordpool, men från preliminärt halvårsskiftet 2011 blir det fyra olika anmälningsområden. Det finns möjligheter att överföra el mellan olika områden i Norden så att man i varje område får en balans mellan produktion (MWh/h), konsumtion (MWh/h) och möjlig överföring (MWh/h) med grannområden. Denna balans gäller här enbart MWh/h, dvs det är den genomsnittliga konsumtionen under en timme som därmed måste vara lika med den genomsnittliga produktionen under samma timme (inklusive import/export). Denna *förhandel* kan ske antingen på Nordpool spot, eller också Elbas och i båda fallen gäller handeln MWh/h.

Inom varje timme är det sedan Svenska Kraftnät som hanterar den kontinuerliga fysiska balansen mellan produktion och konsumtion. Detta sköts på tre olika sätt:

- *Primärregleringen* sköter den automatiska balanseringen, vilken förklaras i avsnitt 1.
- *Timskifteshandel*: Eftersom elproducenterna säljer sin elproduktion för varje enskild timme, så händer det ofta att de vill ändra sin elproduktion just vid tidskiftena. För att undvika för stora ändringar just vid dessa tillfällen har Svenska Kraftnät en bilateral handel med elproducenterna där man kommer överens om att flytta start och stopp just vid tidskiftet och man kommer överens om vilken ersättning som ska utgå för detta.
- *Reglermarknad*: De kontinuerliga förändringarna hanteras i första hand av primärregleringen. Men det finns en begränsad kapacitet i primärregleringen och för att man kontinuerligt ska kunna upprätthålla balansen så ersätts utnyttjad primärreglering genom att andra kraftverk startas eller stoppas inom 5-10 minuter efter behov. Detta kallas *sekundärreglering* och Svenska Kraftnät upphandlar denna kapacitet (uppreglning eller nedreglering) på *reglermarknaden*. Det är huvudsakligen elproducenter som lämnat bud till reglermarknaden om uppreglning (ökad produktion) eller nedreglering (minskad produktion), men det är också möjligt att elanvändare erbjuder sig att öka eller minska sin konsumtion. Reglermarknaden är en nordisk marknad, och om det, t ex, finns ett behov av uppreglning i södra Sverige men det

finns ett bud på uppreglering i östra Danmark som är billigare, så sker uppregleringen där istället förutsatt att det finns utrymme på elnäten.

I figuren nedan antas att producenter och konsumenter har perfekta prognoser (MWh/h) och att producenterna lägger sin produktion på planerat timmedelvärde. Figuren visar också den kontinuerliga elförbrukningen (=produktion) vilken måste upprätthållas genom att via primär och sekundärregleringen hantera skillnaden mellan vad marknadsaktörerna planerar för och vad som faktiskt behövs.



Figur 2: Kontinuerlig konsumtion = produktion samt timmedelvärden.

2.2 Hantering av den kontinuerliga balanshållningen – driftsreserver

En utmaning vid drift av elsystemet är att man inte har perfekta prognoser. Det som kan hända är, t ex, haverier i kraftverk, haverier i kraftledningar, oprognoserade elförbrukningsändringar och oprognoserade ändringar i vindkraftens produktion. Oavsett vad det är som sker så måste de kraftverk som kan styras ändra sin produktion när detta inträffar eftersom total produktion hela tiden måste vara lika med total konsumtion. Man måste därmed hålla *reserver* dvs marginaler så att produktionen kan ändras när detta sker. Utgångspunkten är här att man håller reserver i kraftverk, men det är också möjligt att hålla reserver i form av ändrad konsumtion och/eller ändrad överföring på styrbara kraftledningar till elsystem i grannländer. Men om man ändrar överföringen på styrbara ledningar, så flyttar man balanseringskravet till andra ändan på ledningen och då måste produktionen (eller konsumtionen) ändras där istället.

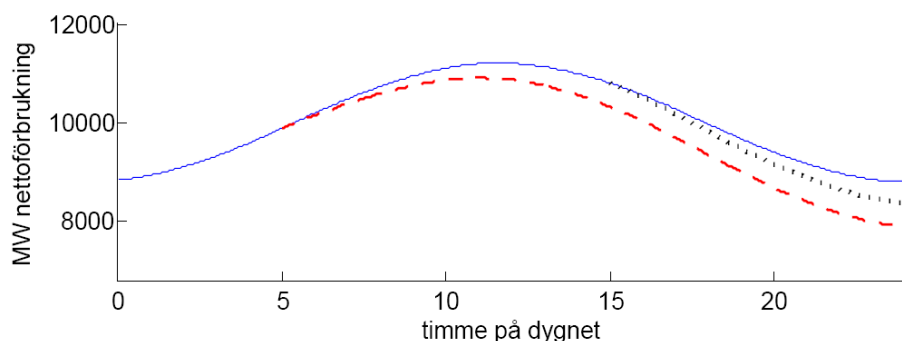
På cykeln ovan så måste någon annan trampa mer om någon slutar trampa. Den som i så fall trampar mer kan därmed inte trampa för fullt redan innan. Den *marginal* som denne har kan därmed kallas en *reserv* som denne person har ifall någon annan slutar trampa, eller om någon bromsar mer. På samma sätt är det i elsystemet i Norden (eller någon annanstans i världen). Om ett kraftverk slutar fungera, om något vindkraftverk minskar sin produktion, eller om någon ökar sin elförbrukning så måste det finnas något annat kraftverk som kan öka produktionen. Om ett kärnkraftverk som vanligtvis producerar 1000 MW plötsligt stannar så måste det finnas marginal i andra kraftverk som direkt kan öka sin produktion med 1000 MW. Om vindkraftens produktion minskar med 200 MW, så måste det finnas andra kraftverk som tar över denna produktion så att elförbrukningen täcks eftersom produktionen alltid är densamma som konsumtionen.

Det är dock viktigt att notera att "reserver" innebär att något kraftverk är *berett* att producera mer! På cykeln så finns det någon person som är *beredd* att trampa mer om det skulle behövas, dvs det är ingen ansträngning att vara *beredd*, det är inte så att den som är beredd måste anstränga sig. På samma sätt är det i elsystemet, det kraftverk som håller *marginaler = reserver* producerar ingen energi, men *skulle kunna* producera mer om det behövs. Det finns ibland en missuppfattning om att kraftverk som hålls som *reserv* hela tiden ökar utsläppen eller göra att man använder vatten i onödan. En viss påverkan kan dock finnas i de fall reservhållning innebär att man kör kraftverk vid lägre verkningsgrad. För att skapa snabba reserver körs ibland kolkraftverk (t ex i Danmark) på låg nivå (med lägre verkningsgrad) trots att produktionskostnaden kan vara högre än elpriset (personen på cykeln får inte ligga hemma och sova). Ett kraftverk (eller en del av ett kraftverk) som står som *reserv* producerar ju ingen el, syftet är ju just att *inte* producera el, utan just att vara *beredd* att göra detta om det behövs. Det är framför allt *energiproduktion* som gör att till exempel kolkraftverk släpper ut koldioxid och som gör att vattnet i vattenkraftverken dammar används genom att låta det passera genom turbinerna. För att få en ekonomiskt effektiv drift är det också viktigt att kontinuerligt hålla reserver för att kunna *reglera ner* om vindkraften ökar utan att denna nedreglering ska orsaka onödigt spill.

Faktaruta 2:
Reserver = marginaler som man håller i en del kraftverk för att möta ökning av elförbrukning och/eller minskning av produktion i vindkraftverk eller andra kraftverk

Det är en stor utmaning att få till ett system så att reserver hålls på ett ekonomiskt effektivt sätt. I vissa kraftverk (t ex vattenkraftverk som körs på bästa verkningsgrad eller i en stillastående gasturbin) så kostar det nästan inget att *hålla reserver*, men *om de används* så blir det istället en kostnad. I andra kraftverk (t ex kolkraftverk som körs på låg nivå) kostar det att hålla reserv (energiförluster pga sämre verkningsgrad), men å andra sidan ökar verkningsgraden om reserven används, dvs produktionen ökar. Ett effektivt sätt att hantera reserverna måste därmed beakta kostnader att hålla dem, kostnad att använda dem samt en uppskattning av hur sannolikt det är att de används. Ett effektivt sätt att hantera reserver måste därmed även inkludera effektiva marknadssignaler som ger rätt incitament. Exemplet avser reserv för produktionsökning, men motsvarande exempel finns för reserver avseende produktionsminskning.

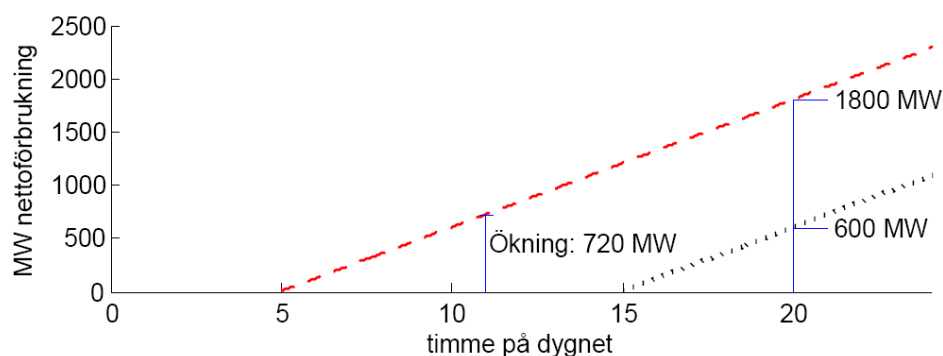
Figuren nedan visar ett exempel på hur man har tillgång till en (felaktig) prognos i början av tidsfönstret, men att man också får in en ny prognos efter några timmar.



Figur 3: Verklig elförbrukning = produktion i icke-vindkraftverk (blå heldragen linje) samt prognoser från tiden t=5 (streckad röd linje) och tiden t=15 (gröna punkter)

De *reserver* som man måste hålla bestäms efter hur snabbt de kan vara tillgängliga samt hur stort behov man har för olika tidsperspektiv, dvs vad som är dimensionerande händelser. Tidsperspektivet är här mycket centralt: Det kan t ex hända att det blir mycket kallt (mycket hög elkonsumtion) om ett par dagar, men om alla tillgängliga resurser man kan tänka sig kan starta inom 4 timmar, så behöver man ju bara besluta om detta 4 timmar innan den höga elförbrukningen inträffar. För just detta exempel kan det dock hända att kraftverket ifråga behöver ha personal på plats och det kan då hända att de behöver en varseltid på 24 timmar för detta.

Om man har kontinuerligt uppdaterade prognoser så innebär detta att man också kontinuerligt minskar osäkerheten för prognosen för en given timme. I figur 4 visas att kl t=5 är prognosfelet för timmen t=20 1800 MW, men kl t=15 har prognosfelet för samma timme sjunkit till 600 MW. Om man har kraftverk som behöver en start-tid på 15 timmar måste man i detta fall ha 1800 MW reserver vid tiden t=5, men om kraftverken kan starta på 5 timmar räcker det med en reservkapacitet om 600 MW som bygger på prognosfelet vid tiden t=15.



Figur 4: Prognosfel från tiderna t=5 (streckad röd linje) och tiden t=15 (gröna punkter). Detta motsvarar den produktionsökning som måste ske inom respektive tidsintervall. Vid tiden t=5 måste det, t ex, finnas reserver om 720 MW som kan startas upp inom 6 timmar.

Här följer en beskrivning av reserverna uppdelad efter hur snabbt de behövs, vilket därmed är kopplat till prognososäkerheten för samma tidsperspektiv.

2.2.1 Primära reserver

Primärreglering avser kraftsystemets förmåga att hålla balans mellan produktion och konsumtion från sekund till sekund. En kortfattad beskrivning är att det i de flesta generatorer som finns i kraftsystemet (de av synkrontyp) finns en direkt koppling mellan rotationshastighet och elektrisk frekvens. Detta innebär att rotationsenergin minskar om frekvensen minskar. Detta medför att om det tillförs lite energi till alla generatorer i kraftsystemet så sjunker frekvensen eftersom energin då tas från generatorernas rotationsenergi. I en del kraftverk, i Sverige vattenkraftverk, finns då frekvenskännare som vid lägre frekvens ser till att kraftverket ökar produktionen. På detta sätt upprätthålls den kortsiktiga balansen mellan produktion och konsumtion. De primära reserverna är de marginaler som måste hållas i de kraftverk vars produktion styrs av frekvensen. Frekvensen är densamma i det nordiska elsystemet vilket gör att dessa reserver delas upp mellan de nordiska länderna.

2.2.2 Sekundära reserver

Sekundärreglering avser kraftsystemets förmåga att utgående från primärregleringens automatiska frekvensreglering hålla balansen mellan produktion och konsumtion. En

konsekvens av primärregleringen är att det uppstår ett frekvensavvikelse, samt att de primära reservmarginaler utnyttjas. Observera att om man har en *konstant* frekvens, oavsett om den är 50,0 Hz eller 49,9 Hz så är det balans mellan produktion och konsumtion på samma sätt som på cykeln om den går med konstant hastighet. Systemet är dock designat för att köras inom området 49,9-50,1 Hz och utanför detta intervall finns det mindre marginaler. I närheten av dessa gränser vill man därmed återföra systemet till mitten av intervallet. Enda sättet att göra detta är att starta nya kraftverk (eller koppla bort elkonsumtion) vid frekvens lägre än 50,0 Hz, eller stänga av kraftverk vid frekvens högre än 50,0 Hz. Detta måste göras relativt ofta, ofta flera gånger per timme, eftersom konsumtionen och därmed frekvensen varierar kontinuerligt. Sekundära reserver är därmed kraftverk som kan starta upp i praktiken inom 5-10 minuter. I Norden hanteras dessa reserver på reglermarknaden. Det sker därmed ett kontinuerligt samspel mellan primär- och sekundärregleringen.

2.2.3 Balanserings- och dygnsreserver

Dygnsreglering innebär att produktionen måste ändras från timme till timme eftersom konsumtionen och vindkraften varierar från timme till timme. För även denna reglering måste man planera kontinuerligt eftersom det i vattenkraftsystem finns kopplingar mellan olika kraftverk på så sätt att om man tappar vatten i ett vattenkraftverk så kommer det ner till nästa efter en viss tid. I värmekraftsystem måste man ta hänsyn till att det tar en viss tid att starta kraftverken, samt att pådragsgradienten i MW/minut är begränsad. Det finns också normalt prisskillnader mellan olika kraftverk så att man helst startar kraftverk med låg driftkostnad. Denna tidskoppling gör att planering är nödvändigt, vilket i sin tur medför att tillgången till prognoser är viktigt så att man vet planeringsförutsättningarna. De viktigaste prognoserna är förbrukningsprognosen, vindprognosen och prisprognosen, dvs prognosen för vad det under dygnet kan kosta att köpa eller sälja produktion. Man måste också bli ha prognos på vilka kraftverk som är tillgängliga under dygnet men dessa prognoser brukar oftast vara tillförlitliga. De reserver som behövs här avser kraftverk som inom en eller flera timmar kan öka eller minska sin produktion.

2.2.4 Vecko-reglering

Veckoreglering är relativt lik dygnsreglering men tidsperspektivet är en vecka i stället för ett dygn. Även här är planering och därmed prognoser viktigt. Skillnaden är att prognoserna blir mer osäkra. Dessutom kan prognosen avseende vattentillrinningen i älvarna bli en ytterligare osäkerhetsfaktor.

2.2.5 Säsongs-reglering

Säsongsreglering görs i kraftsystem där man har tillgång till vattenkraftverk med så stora magasin så att man kan lagra vatten mellan olika delar av året. I denna typ av system, som t ex det svenska och norska, är det viktigt att vattnet används under året på ett ekonomiskt fördelaktigt sätt. För detta är självfallet en planering nödvändig eftersom mängden vatten som skall sparas beror på en avvägning mellan nyttan av att använda vattnet direkt eller att spara det för någon framtida användning. I säsongsplaneringen ingår också planeringen av revisioner av värmekraftverk som ju måste samordnas med behovet av kraft. Säsongsplaneringen bygger huvudsakligen på kända fenomen som att tillrinningen är störst när snön smälter vid vårfloren och det är kallare och högre elförbrukning på vintern. I praktiken måste man kontinuerligt fatta beslut om hur mycket vatten som ska sparas för framtiden och hur mycket som ska användas inom de närmaste timmarna/dygnen/veckorna. Man måste dock beakta osäkerheter vid denna planering. Osäkra faktorer är i det nordiska systemet framför allt vattentillrinningen men också elkonsumtionen och värmekraftverkens tillgänglighet. Det finns också en osäkerhet i priset som i sin tur är kopplad till bland annat

osäkerheter i prognoser för tillrinningar och belastningar. En större utmaning i detta sammanhang är planeringen inför vårfloden där man vill ha magasinen så tomma som möjligt när vårfloden startar och fyller på magasinen, men när denna inträffar är osäkert.

2.2.6 Kommentarer

Som framgår av denna kortfattade genomgång finns det många tidskopplingar som är invävda i varandra. Den kontinuerliga balansen upprätthålls med hjälp av primärregleringen och till viss del av sekundärregleringen. Men för att detta ska fungera är det nödvändigt att kontinuerligt planera och omplanera för att det ska finnas tillräckligt med marginaler så att man på ett så tillförlitligt och ekonomiskt sätt upprätthåller balansen mellan produktion och konsumtion. Man kan inte addera olika typer av reserver eftersom de är invävda i varandra. Vad som kan hända på en timme är till exempel en del av det som kan hända under ett dygn.

Faktaruta 3:
Reservbehov för olika tidsperioder kan inte adderas eftersom de ingår i varandra.

2.3 Hantering av låg vindkraftsproduktion och hög elförbrukning

Faktaruta 4:
Höglastreserv = kraftverk som bara används vid extrem elförbrukning och/eller om många kraftverk/ledningar havererar

I alla elsystem försöker man alltid att se till att man har tillräckligt med kraftverk för alla olika situationer. Målet är att även denna situation ska kunna hanteras på en marknad utan detaljerade ingrepp från systemoperatörer/myndigheter. Frågan är bara vad "tillräckligt" betyder. Man kan *aldrig* garantera att man till 100% alltid klarar elförbrukningen oavsett nivån på den samt vilka kraftverk som fungerar. I Sverige finns det, till exempel, alltid en viss sannolikhet (mycket liten) att flera kraftverk stoppas eller inte är i drift av planerade eller oplanerade skäl samtidigt som ledningar till utlandet inte fungerar. Skulle detta hända samtidigt som man får en extrem elförbrukning så måste konsumenter kopplas bort eftersom det inte finns tillräckligt med produktionskapacitet. Detta har inte skett i modern tid i Sverige utan vi har hittills haft tillräckligt med "marginaler", dvs det har alltid funnits fler kraftverk tillgängliga (i Sverige eller via ledningar till grannländer) för att klara elförbrukningen. Man ska därmed komma ihåg att man vid planeringen av elsystemet även beaktar att man har nytta av ett enskilt kraftverk för att klara hög elförbrukning även om det inte är 100% säkert att det fungerar just när det är som kallast. Det viktiga är hur alla kraftverk tillsammans fungerar för att man ska klara hög elförbrukning. Det finns inget kraftverk där man till 100% kan garantera att det fungerar vid hög elförbrukning.

Faktaruta 5:
Effektivvärde = ett kraftverks effektivvärde i MW motsvarar den ökning av elförbrukningen i MW som kan accepteras med bibehållen risk för elbrist efter det att kraftverket byggs.

Frågan är då vad som händer om en stor del av elproduktionen kommer från vindkraft? Konventionella kraftverk som kärnkraft kan stoppas eller vara stängda av olika skäl och därmed inte producera el. Detta är dock relativt ovanligt men måste förstås beaktas när man väljer hur många kraftverk som behövs. Vindkraft producerar bara el när det blåser och det händer ganska ofta att det blåser lite. Vad man dock måste tänka på är att hela det nordiska elsystemet hänger ihop. Dessutom är det nordiska elnätet sammankopplat med det centraleuropeiska. Detta gör att man måste beakta att det ofta blåser någonstans och att det

ibland även blåser när det är extremt kallt och/eller när andra kraftverk eller ledningar till grannländer havererar. På samma sätt som att man aldrig kan garantera att ett kärnkraftverk eller oljeeldat kraftverk fungerar exakt när elförbrukningen är som högst kan man inte förutsätta att vinden blåser ordentligt vid hög elförbrukning. För att få fram om man kan minska antalet andra kraftverk tack vare vindkraften så måste man uppskatta vindkraftens effektvärde. Detta gör man på samma sätt för alla typer av kraftverk oavsett om det är vind-, kol-, kärn- eller vattenkraftverk. Vindkraftens effektvärde är ofta i storleksordningen 10-20% av installerad mängd vindkraft.

Ett exempel: Antag att det aldrig blåser vid hög elförbrukning. 10 TWh vindkraft → samma energi som ett 1400 MW gas/kol/kärnkraftverk som körs 7000 h/år ($1400 \text{ MW} \cdot 7000 \text{ h} = 10 \text{ TWh}$). Om vindkraftens ska ha samma effektvärde som baskraftverket (om detta antas fungera till 100%) behöver denna kompletteras med, t ex, 1400 MW gasturbiner. Med ett antagande om en investeringskostnad för gasturbinerna om 300 kr/kW, år (att användas några timmar kanske vart 5:e år?) så blir denna kostnad utslagen på all vindkraft 4 öre/kWh. Men:

- Andra kraftverk, t ex kärnkraft, är inte alltid tillgängliga vid hög elförbrukning.
- Det är ett alldeles för starkt antagande att det "aldrig blåser"
- Andra lösningar (än gasturbiner) är billigare. Om man ska finansiera gasturbinerna med enbart elpriset och dessa används i genomsnitt 1 timme per år, så måste elpriset vara 300 kr/kWh. Vid det elpriset finns det många lösningar som är betydligt billigare, t ex att erbjuda kunder att minska sin elförbrukning.
- Mot bakgrund av att vi i Norden har god tillgång till vattenkraft, under antagandet att dagens planer på ny el produktion realiserar så att vi har en stark effektbalans, och att flaskhalsar successivt byggs bort i transmissionsnätet, är det troligt att kraftsystemet inte behöver kompletteras med ytterligare gasturbiner på grund av utbyggnad av större mängder vindkraft.

Slutsatsen är att *höglastereserver* är en mindre kostnad vid utbyggnad av större mängder vindkraft. I det korta perspektivet med en stark effektbalans ca 0 öre/kWh och i ett längre perspektiv med 5-10 GW vindkraft och eventuellt stängda kol- eller kärnkraftverk lägre än 4 öre/kWh eftersom det ibland blåser vid hög elförbrukning och annan balansering än gasturbiner är mer ekonomiskt fördelaktigt. För exaktare uppskattningar krävs mer omfattande analys.

2.4 Hantering av hög vindkraftsproduktion och låg elförbrukning

Om man tillför stora mängder vindkraft till ett område utan att ändra på någonting annat så kan konsekvensen bli, t ex mycket låga priser och/eller att vatten måste spillas förbi turbinerna och/eller att all producerad vindkraft inte kan användas. Om dessa situationer uppstår ofta så blir det ekonomiskt fördelaktigt att ha a) mer transmission ut från området, b) investera i pumpkraft i älvar (lågt pris på pumpning till högre magasin och vattnet kan användas vid högre priser), c) flexibel elförbrukning (t ex elpatroner i fjärrvärmen), d) ladda elbilar vid dessa tillfällen. Det centrala är här att lämplig dimensionering är en ekonomisk fråga på så sätt att låga priser gynnar investering av förslagen a)-d) samtidigt som att stora sådana investeringar höjer elpriset. Det är i praktiken svårt att dimensionera systemet "rätt" eftersom det finns såväl ledder för olika investeringar som osäkerheter vid investeringsplaneringen

Om elsystemet är "rätt" dimensionerat så innebär det att det finns en ekonomisk balans mellan utbyggt transmissionssystem, flexibel elförbrukning, investeringar i pumpkraft och accepterad

mängd spill vid situationer med till exempel hög vindkraft och lägre elförbrukning. "Rätt" dimensionering innebär i praktiken att ytterligare investeringar (pumpkraft, transmissionssystem, flexibel elförbrukning) har högre kostnad än det värde de tillför. Det är viktigt att här notera att även ett "rätt" dimensionerat elsystem kan medföra spill eftersom det inte är rationellt att dimensionera elsystemet för att inte få spill ens vid, till exempel, mycket hög vindkraftsproduktion på midsommarnatten då det är relativt mycket vatten i magasinen och elförbrukningen är låg.

I praktiken är det inte möjligt att få till "rätt" dimensionering även om detta är målsättningen. Den avreglerade elmarknaden har medfört att man inte samplanerar utbyggnad av produktion, flexibel elförbrukning och transmissionsnät eftersom dessa delar ofta hanteras av olika organisationer. Till detta kommer osäkerheter i efterfrågan, framtida elpriser och ledtider från beslut till faktisk idrifttagning av kraftverk och ledningar etc.

Slutsatsen är att oavsett om man har "rätt" dimensionering eller inte så är det av stort värde att den "övriga produktionen", dvs den som inte är vindkraft, har möjlighet att producera på en så låg nivå som möjligt utan spill. Om den övriga produktionen på ett effektivt sätt kan producera på en låg nivå kan man därmed få in mycket vindkraft utan att investera i flexibel elförbrukning, pumpkraft, nya ledningar eller få mer spill. För vattenkraften innebär en låg produktionsnivå utan spill att man, förutom de minimivattenflöden man är ålagd att släppa enligt vattendomar, bara släpper förbi vatten vid produktion av el samt att det finns tillräckligt med utrymme i vattenmagasinen så att vattentillrinningen kan sparas vid hög vind och låg elförbrukning.

3 Vilken elproduktion ersätts av vindkraft?

Som framgår ovan så finns det alltid balans mellan produktion och konsumtion. Detta innebär därmed att all produktion alltid används! Det som matas in i elnätet någonstans kommer alltså alltid till användning. Om ett vindkraftverk producerar energi så kommer därmed behovet av annan elproduktion att minska i motsvarande grad! För varje kilowattimme vindkraft behövs en kilowattimme mindre från något annat kraftverk.

Frågan är då vilket kraftverk som ersätts. Nedan resonerar jag kring några olika kraftslag och deras roll i kraftsystem med mycket vindkraft:

Vattenkraft: Just när vindkraftens produktion ökar så är det oftast rationellt att minska på vattenkraftens produktion eftersom den är relativt enkel att styra. I praktiken minskar man mängden vatten som går genom kraftverket och sparar istället vatten i vattenkraftdammen. Man måste dock komma ihåg att det då blir mer vatten i magasinet som kan användas vid något senare tillfälle. I princip kan man säga att för varje kilowattimme vindkraft så sparas en kilowattimme vattenkraft i dammen. Totalt sett kommer vattnet i magasinet att producera lika mycket energi, dvs vindkraften ersätter *inte* vattenkraften utan den medför att vattenkraften flyttar produktionen mellan olika timmar. Den energimängd som vattenkraften producerar beror framför allt på hur mycket det

Faktaruta 6:

Varje kilowattimme vindkraft som matas in i elnätet minskar behovet av annan elproduktion eftersom total elproduktion alltid är densamma som elförbrukning + förluster.

regnar. Det är dock viktigt att notera att det ovanstående beskriver den generella problematiken. Det finns många viktiga detaljer som måste beaktas för att kunna få en exakt uppskattning av möjligheterna. Dessa inkluderar:

- Under vårfloden kan möjligheterna att spara vatten i dammar vara begränsad.
- Olika tappningsnivåer och olika magasinsnivåer innebär olika verkningsgrader i vattenkraftverken, dvs olika mängd energi per kubikmeter vatten.
- Prognososäkerheten gör att man måste ha vissa marginaler eftersom vatten som tappas genom en turbin i ett kraftverk kan ta, t ex, en timme tills det kommer fram till nästa magasin, och då har förutsättningarna ändrats.
- Vattendomar sätter tydliga begränsningar för hur magasin får fyllas/tömmas och hur anläggningar får köras. Likaså kan det finnas av kraftföretagen självpåtagna begränsningar, d.v.s. vattendomarna utnyttjas inte fullt ut då det exempelvis skulle innebära olägenheter för kringboende och turister
- Det är en kombination av vattentillrinning, fysiska reglermöjligheter och vattendomar som begränsar reglermöjligheterna i vattenkraftverken.

Kärnkraft: Kärnkraft har en driftskostnad (öre per kilowattimme) som nästan alltid är lägre än elpriset. Detta gör att man alltid försöker producera så mycket som möjligt i dessa kraftverk. När vindkraftens produktion ökar så finns det därmed andra kraftverk där man hellre minskar produktionen. När vattenkraften sparas så används den nästan alltid till att ersätta elproduktion som har högre driftkostnad än kärnkraften, t ex kolkraft i våra grannländer Danmark, Finland, Polen eller Tyskland. Ett undantag skulle kunna vara en kombination av att man har en begränsad exportmöjlighet till länder med dyrare elproduktion och att t ex Sverige bygger ut så mycket vindkraft att den enda kraft som kan stängas av är kärnkraft.

Kolkraft: : Det finns kolkraft i det Nordiska och Nordeuropeiska kraftsystemet som är möjlig att ersätta med annan kraftproduktion. Om det regnar mycket i Sverige och/eller om det finns mycket vindkraft så gör det att det framför allt blir kolkraften som minskar sin produktion i dessa länder genom att vi antingen exporterar el till dessa länder eller också att vi minskar vår import. Anledningen till att just kolkraften minskar sin produktion är att det oftast är just den som är dyrast i drift. Ibland kan det finnas andra kraftverk, t ex oljekraftverk, som har ännu högre driftskostnader än kolkraften och då minskar man produktionen där istället. Det kan tilläggas att handeln med utsläppsrätter för koldioxid medför att just kolkraften ökar mest i pris (mest koldioxid per kWh elproduktion) vilket ökar intresset för att just minska denna produktion.

Slutsats: Vindkraftens produktion medför att andra kraftverk körs på lägre effekt jämfört med om vindkraften inte fanns. I Norden finns en stor mängd vattenkraft och vindkraften medför att produktionen i vattenkraften omplaneras och förläggs till andra tidpunkter. Produktion av vindkraft vid en tidpunkt kan därmed indirekt medföra minskad produktion av värmekraft vid en annan tidpunkt. Vindkraftens produktion gör att man framför allt minskar produktionen i kolkraftverk i våra grannländer. Detta förutsätter dock att det finns tillräckligt med transmissionskapacitet till de länder där denna kolkraft finns, samt att den aktuella prissättningen gör att kolkraft är det kraftslag som har högst driftkostnad.

4 Måste vattenkraften byggas ut om vindkraften byggs ut?

Detta är en ganska komplicerad fråga. Anledningen är att vi har ett elnät i hela Norden som samkörs och det finns många andra frågeställningar som har en stor inverkan på detta, t ex om det blir mer vindkraft i Norge, fler förbindelser till omvärlden (Norge, Finland och Litauen diskuteras för närvarande, jan-10) etc. En viktig frågeställning är också vad ordet ”måste”

betyder. Menar man ”tekniskt nödvändig” och/eller ”ekonomiskt rationellt”? En frågeställning är också om ”bygga ut” betyder ändrade vattendomar, effektutbyggnader, dammutbyggnader och/eller utbyggnad av orörda älvsträckor. Det finns idag ingen rapport (januari 2010) som visar att man ”måste” bygga ut vattenkraften! Däremot finns det en hel del missuppfattningar om vad olika rapporter egentligen visar. Nedan beskrivs två av dessa rapporter. Det är också viktigt att notera att vattenkraften kan ses som en nordeuropeisk resurs. Detta medför att även om vi inte byggde ut vindkraften i Sverige, men däremot bygger fler ledningar till grannländerna, så finns det ett ekonomiskt intresse av att kunna ändra den svenska produktionen efter behoven i våra grannländer. Vid höga priser i grannländerna (t ex hög elförbrukning + låg vind) finns ett ekonomiskt intresse av hög svensk produktion och hög export, medan det vid mycket låga priser (t ex låg konsumtion och hög vind i grannländerna) istället finns ett ekonomiskt intresse av hög import och låg egen produktion.

Faktaruta 7:

Det finns idag ingen rapport som visar att man i Sverige måste bygga ut vattenkraften om vindkraften byggs ut.

4.1 Svenska Kraftnäts rapport från 1 juni 2008

Denna rapport heter ”Storskalig utbyggnad av vindkraft – Konsekvenser för stamnätet och behovet av reglerkraft” och kan laddas ner från Svenska Kraftnäts hemsida:

<http://www.svk.se/Pressinfo/RapporterRemisser/Rapporter/2008-06-01>

Kommentarer till denna finns bland annat i IEA-rapporten “IEA Wind Task 25, Final report, Phase one 2006-08, Design and operation of power systems with large amounts of wind power”, avsnitt 3.6.2. Den engelska upplagan och en svensk sammanfattning kan laddas ner från, t ex, http://www.kth.se/ees/forskning/publikationer?!=sv_SE
Skriv Author: ”Söder” och Title ”IEA” så kan man hitta rapporterna.

I Svenska Kraftnäts rapport så finns följande text på sidan 3: ”Behovet av reglerförmåga: Till skillnad från utbyggnad av annan elproduktion kommer en storskalig utbyggnad av vindkraft att ställa ökade krav på hur mycket reglerförmåga som behövs för att upprätthålla balansen mellan total tillförsel och uttag av el. Idag är det tämligen enkelt att prognostisera balansen mellan produktion och förbrukning. Den tillkommande vindkraften, med ett relativt stort inslag av slumpmässighet, ställer krav på ökad tillgång till reglerresurser”

På sidan 4 (i sammanfattningen) finns också följande resultat summerade:
”Det totala utökade reglerbehovet bedöms uppgå till:

- 1400-1800 MW vid en utbyggnad av 10 TWh vindkraft och till
- 4300-5300 MW vid en utbyggnad av 30 TWh vindkraft”

Kommentarer: Detta har av flera läsare tolkats som att rapporten menar att man behöver bygga ut reglerkraften när man bygger ut vindkraften. Det måste då påpekas att det är *inte* vad rapporten kommit fram till! Dessutom innehåller de uppskattningar man kommit fram till en rejäl marginal. Angående detaljer om dessa

Faktaruta 8:

Vid hög produktion av vindkraft fungerar övriga kraftverk som reservkraftverk då vindkraften minskar. Hög vindkraftsproduktion innebär därmed automatiskt mer reservkraft att användas vid minskad vind utan nybyggnad.

marginaler för MW-nivåerna för reglerbehovet hänvisas till rapporterna från IEA-arbetet ovan.

Den viktigaste missuppfattningen och feltolkningen av denna rapport är dock att ”ökat behov av reglerkraft” automatiskt leder ”behov av att bygga ut mängden reglerkraft”. Antag att vi i Sverige installerar 5000 MW vindkraft i dagens system. När behövs då reglerkraft? Jo det är framför allt vid hög vindkraftproduktion (upp mot 5000 MW) då man måste ha något som kan starta ganska snabbt (dvs reservkraft) om vinden mojar. Men i just det läget så körs ju vattenkraften på låg nivå eftersom vindkraften producerar mycket! Detta innebär i praktiken att mycket produktion i vindkraften → mer andra kraftverk körs på låg → dessa kraftverk kan öka sin produktion om det mojar. Detta innebär att ju mer vindkraft man har desto mer reserver finns det också. Det är därmed helt korrekt att mer vindkraft ger större behov av reserver mer man kan därmed *inte* dra slutsatsen att detta i sig leder till behov av utbyggnad! Det måste då tilläggas att denna kommentar gäller *utbyggnad i form av mer effekt!* Utmaningen U2, vilken behandlats i avsnitt 3.2 diskuterar frågan om hög vind vid låg elförbrukning och då kan mintappningsnivåer och magasinbegränsningar vara viktiga.

4.2 Energimyndighetens Vattenkraftsrapport

Denna rapport heter ”ER 2008:24 Vattenkraften och energisystemet” och kan laddas ner från <http://www.swedishenergyagency.se/web/bibshop.nsf/frameset.main?ReadForm&Doc=2049>

I denna rapport citeras huvudsakligen Svenska Kraftnäts rapport vilken kommenteras ovan. Det finns ingen ny analys i denna rapport, t ex inga nya beräkningar.

4.3 Övriga kommentarer

En intressant frågeställning, som dock inte belyses i vare sig Svenska Kraftnäts eller Energimyndighetens rapporter, är hur det nordiska elsystemet kommer att utvecklas om man bygger ut mer vindkraft. Teoretiskt kan detta benämnas *investeringsdynamik*, där vissa investeringar påverkar andra investeringar. Några kommentarer:

- a. Antag att vi inte bygger ut så mycket vindkraft i Sverige. Om man bygger ut mycket förbindelser till omvärlden så ”importerar” Sverige prisstrukturen i omvärlden med mer fluktuerande priser, vilket ökar värdet på reglerbara kraftverk. Dessutom medför detta troligen en generell högre elprisnivå, vilket i sin tur ökar värdet av investeringar i ny vattenkraft.
- b. Antag att vi i Sverige bygger ut vindkraften mycket (5-10 GW), men förbindelserna till omvärlden endast ökar marginellt (= enstaka GW). I det läget talar mycket för att elpriset i Norden generellt pressas ner. I det läget minskar intresset för energiinvesteringar i vattenkraft jämfört med idag eftersom de blir mindre lönsamma. Vad som i detta fall dock kan hända är att även andra existerande kraftverk i Norden, t ex vissa danska kolkraftverk kommer läggas ner eftersom de används rätt sällan och intäkterna inte kan täcka de fasta kostnaderna. Detta i sin tur kan möjligen påverka prisnivån vid låg vind och hög förbrukning, vilket kan öka intresset för flexibel elförbrukning, se utmaning U1.
- c. Vad som på längre sikt är intressant är också vad som händer med den svenska kärnkraften. Om scenario a) ovan blir av ökar intresset att upprätthålla en hög

kärnkraftseffekt inklusive eventuella nybyggnader. Men om scenario b) inträffar blir det snarare det omvända.

Det är givetvis mycket intressant att närmare studera hur olika scenarier kan slå på intresset för olika investeringar men då behöver man göra en betydligt mer noggrann analys än vad som gjorts här.

Appendix Om effekt och energi.

Effekt är den kapacitet, den maxnivå, som en elkonsument eller en elproducent har. Den mäts i Watt (W), kW (kilowatt = 1000 Watt), eller MW (megawatt = 1000 kW). Exempel är en glödlampa på 60 W eller ett vindkraftverk på 2 MW.

Energi är den förbrukning som går åt under en viss tid. Den mäts i till exempel kWh (kilowatt-timmar), MWh (megawatt-timmar = 1000 kWh), eller TWh (terawatt-timmar = 1 miljon MWh). En glödlampa om 60 W som är igång i 10 timmar förbrukar $60 \cdot 10 = 600 \text{ Wh} = 0,6 \text{ kWh}$. Ett vindkraftverk om 2 MW som producerar på halv effekt under 10 timmar producerar $2 \cdot 10 \cdot \frac{1}{2} = 10 \text{ MWh}$. Detta innebär att

$$\text{Energi} = \text{Effekt} \cdot \text{tid}$$

Ett år (ej skottår) har 8760 timmar ($24 \cdot 365 = 8760$). Detta gör att en producent som har ett kraftverk på 1 MW som producerar hela året utan avbrott så produceras totalt 8760 MWh. En konsument som har ett 1000 W elradiator igång hela året förbrukar därmed 8760 kWh.

Ett vindkraftverks produktion varierar dock eftersom vinden varierar. Om man har ett 1 MW vindkraftverk så producerar det ibland 1 MW (vinden blåser mellan ca 14 m/s och ca 27 m/s) ibland ingenting alls (vinden blåser mindre än ca 4 m/s) och övrig tid mellan noll och 1 MW. Om man tar ett genomsnittlig (medelvärde för 2008) svensk placering där man sätter upp ett vindkraftverk så producerar detta 1-MW vindkraftverk ungefär 2200 MWh per år. Den energi i MWh som varje installerad MW effekt producerar per år motsvarar kraftverkets *utnyttjningstid*:

$$[\text{Energiproduktion per år}] = [\text{Installerad effekt}] \cdot [\text{utnyttjningstid}]$$

För vindkraftverket ovan är utnyttjningstiden 2200 timmar, men kan på ett verkligt blåsig ställe bli över 2800 timmar och på en plats med mindre vind bli under 2000 timmar. Utnyttjningstid är *inte* detsamma som driftstid. Driftstid är antal timmar per år som kraftverket är igång. Drifttiden är betydligt större än utnyttjningstiden. Ett kraftverk som kör på halv effekt under 5000 timmar per år och står still resten har drifttiden 5000 timmar och utnyttjningstiden 2500 timmar.



5 Några referenser

- [1] *Wind power myths debunked*, Milligan, M.; Porter, K.; DeMeo, E.; Denholm, P.; Holttinen, H.; Kirby, B.; Miller, N.; Mills, A.; O'Malley, M.; Schuerger, M.; Soder, L.; Power and Energy Magazine, IEEE, Volume 7, Issue 6, November-December 2009 Page(s):89 – 99
- [2] *IEA Wind Task 25, Final report, Phase one 2006-08, Design and operation of power systems with large amounts of wind power* Kan laddas ner från <http://www.ieawind.org/AnnexXXV.html>
- [3] *Experience From Wind Integration in Some High Penetration Areas*, Soder, L.; Hofmann, L.; Orths, A.; Holttinen, H.; Wan, Y.; Tuohy, A.; Energy Conversion, IEEE Transaction on Volume 22, Issue 1, March 2007 Page(s):4 – 12
- [4] *A review of different methodologies used for calculation of wind power capacity credit*, Soder, L.; Amelin, M.; Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 20-24 July 2008 Page(s):1 – 5
- [5] *On methodology for modelling wind power impact on power systems*, Soder, L. (R. Inst. of Technol., Stockholm, Sweden); Holttinen, H. Source: International Journal of Global Energy Issues, v 29, n 1-2, p 181-98, 2008
- [6] *On limits for wind power generation* Soder, L. (Dept. of Electr. Eng., Royal Inst. of Technol., Stockholm, Sweden) Source: International Journal of Global Energy Issues, v 21, n 3, p 243-54, 2004
- [7] *Estimation of potential wind energy curtailment for wind power plants in power systems with bottleneck problems* Matevosyan, J. (Riga Technical Univ., Riga, Latvia); Soder, L. Source: EPE-PEMC 2004 11th International Power Electronics and Motion Control Conference, p 5-502 Vol.5, 2004
- [8] *Reserve margin planning in a wind-hydro-thermal power system*, Soder, L., Power Systems, IEEE Transactions on Volume 8, Issue 2, May 1993 Page(s):564 – 571

Fler artiklar finns att hämta på http://www.kth.se/ees/forskning/publikationer?l=en_UK

6 Om författaren



Lennart Söder är professor i Elektriska Energisystem vid KTH. Han undervisar i kurser om elnät, vattenkraftsplanering och elmarknadens funktion mm. Han har varit engagerad i olika projekt rörande integration av vindkraft i elsystemet sedan 1982. För mer information se <http://www.eps.ee.kth.se/personal/lennart/>