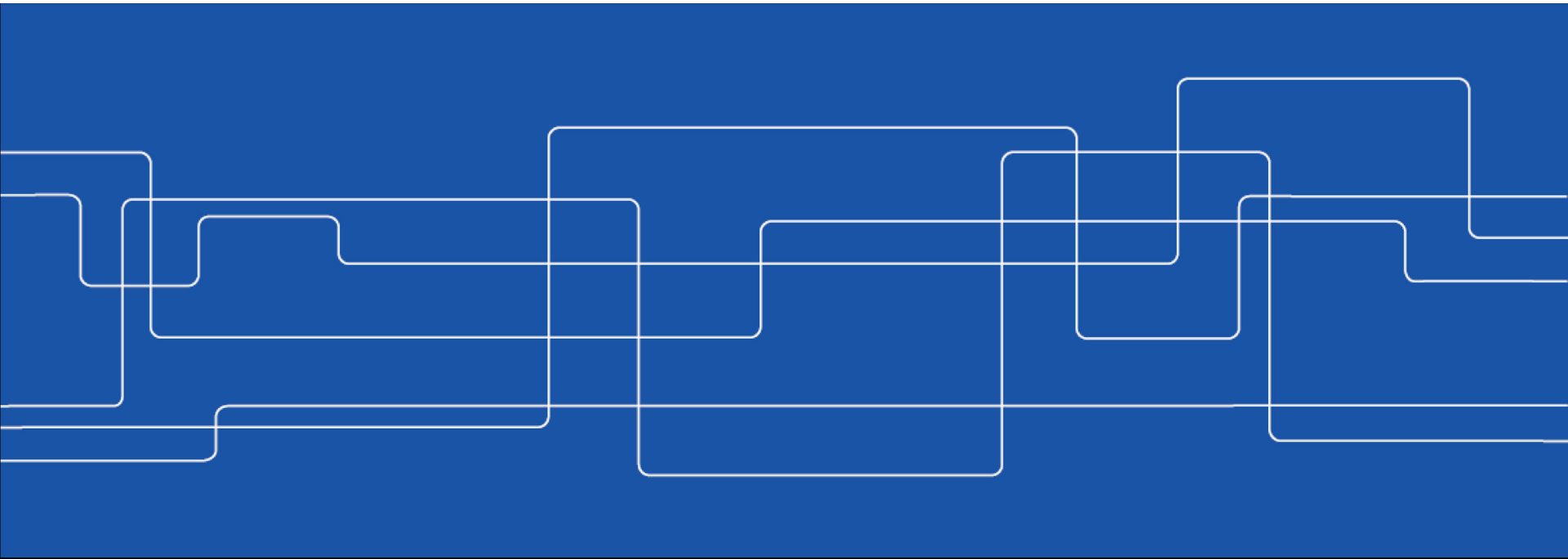




Frekvensreglering

EG2205 Föreläsning 5-6, vårterminen 2015

Mikael Amelin





Kursmål

Förklara hur balansen mellan produktion och konsumtion upprätthålls i ett elsystem, beräkna hur frekvensen påverkas av olika händelser i elsystemet, samt utforma frekvensregleringen så att elsystemet har tillräckligt stora marginaler.

Det finns inget praktiskt
användbart sätt att lagra el i
ett elsystem!

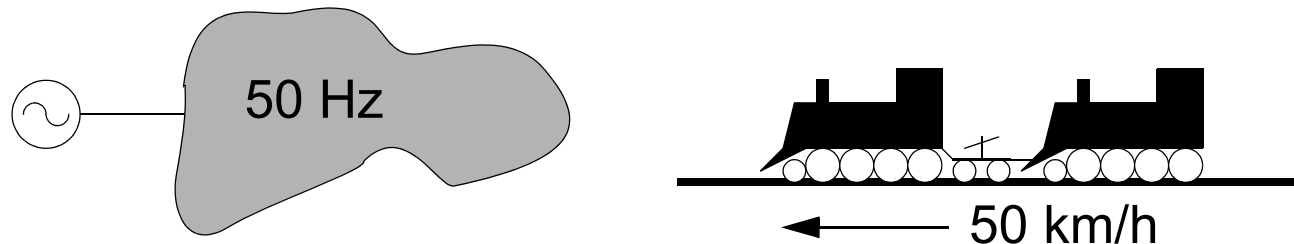
- El måste produceras i samma ögonblick som den förbrukas.
- I alla större elsystem krävs automatiska regelsystem.

Synkrona nät

- Ett elsystem som kopplas ihop med växelströmsledningar och transformatorer utgör ett **synkront nät**.
- Det kan bara finnas en frekvens i ett synkront nät.

Analogi

En synkronmaskin kan liknas med en dressin mellan två lok — den måste hålla samma hastighet som resten av tåget, annars blir den krossad.







Frekvensområde

Frekvensen i ett stort elsystem **måste** hållas kring ett nominellt värde!

- Vissa frekvenser kan skada viktig utrustning i elsystemet:
 - Resonans i turbinblad och turbinaxlar.
 - Uppvärmning av generatorer och transformatorer.
- Vissa laster kan störas.

Frekvensområde

- Automatiska styrsystem:
 - Normaldrift (I Sverige: 49,9–50,1 Hz)
 - Störningsreserv (I Sverige: 49,5–49,9 Hz)
- Bortkoppling av flexibel last, t.ex. export på HVDC-ledningar, elpannor, värmepumpar, pumpkraftverk (I Sverige: 49,0–49,8 Hz)
- Automatisk lastbortkoppling (In Sweden: 48,0–48,8 Hz)
- Manuell lastbortkoppling – “roterande” lastbortkoppling (In Sweden: $< 48,0$ Hz)



System för frekvensreglering

- Primärreglering
 - Tidsskala: sekunder
 - Automatiskt reglersystem
- Sekundärreglering
 - Tidsskala: minuter
 - Automatiskt reglersystem
- Tertiärreglering
 - Tidsskala: 10–15 minuter
 - Aktiveras manuellt



Primärreglering

Syftet med primärregleringen är att upprätthålla balansen mellan elproduktion och last.

Motsvarar en proportionell regulator (P-regulator) i reglertekniken.



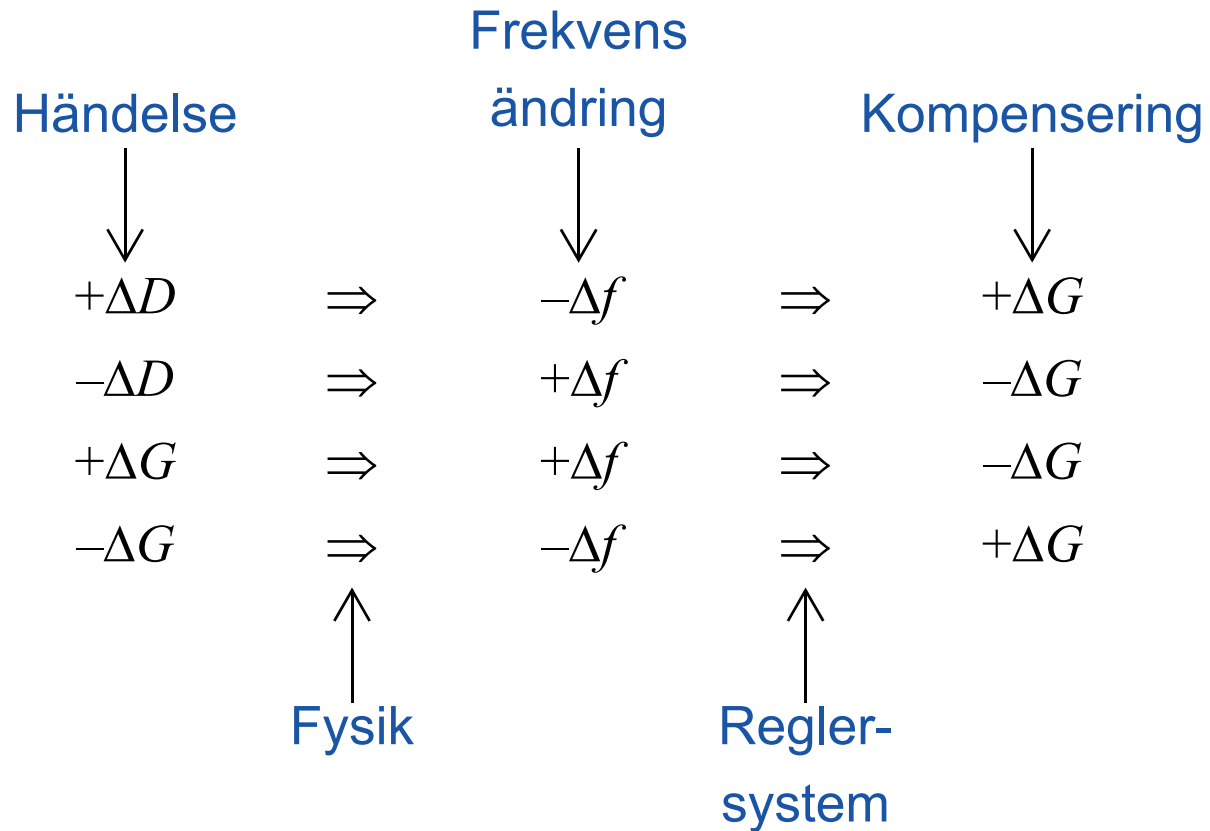
Primärreglering

Exempel: lastökning

- System i balans.
- Lasten ökar, men elproduktionen förblir densamma.
- Energi tas från rörelseenergin i alla synkronmaskiner.
- Synkronmaskinerna roterar långsammare.
- Frekvensen sjunker.
- Sensorer i vissa kraftverk reagerar på frekvenssänkningen genom att öka produktionen i detta kraftverk tills frekvensen är stabil igen.

Primärreglering

Översikt



Reglerstyrka

Definition: Reglerstyrkan anger hur produktionen i ett kraftverk ändras då frekvensen i systemet ändras:

$$G = G_0 - R(f - f_0),$$

där

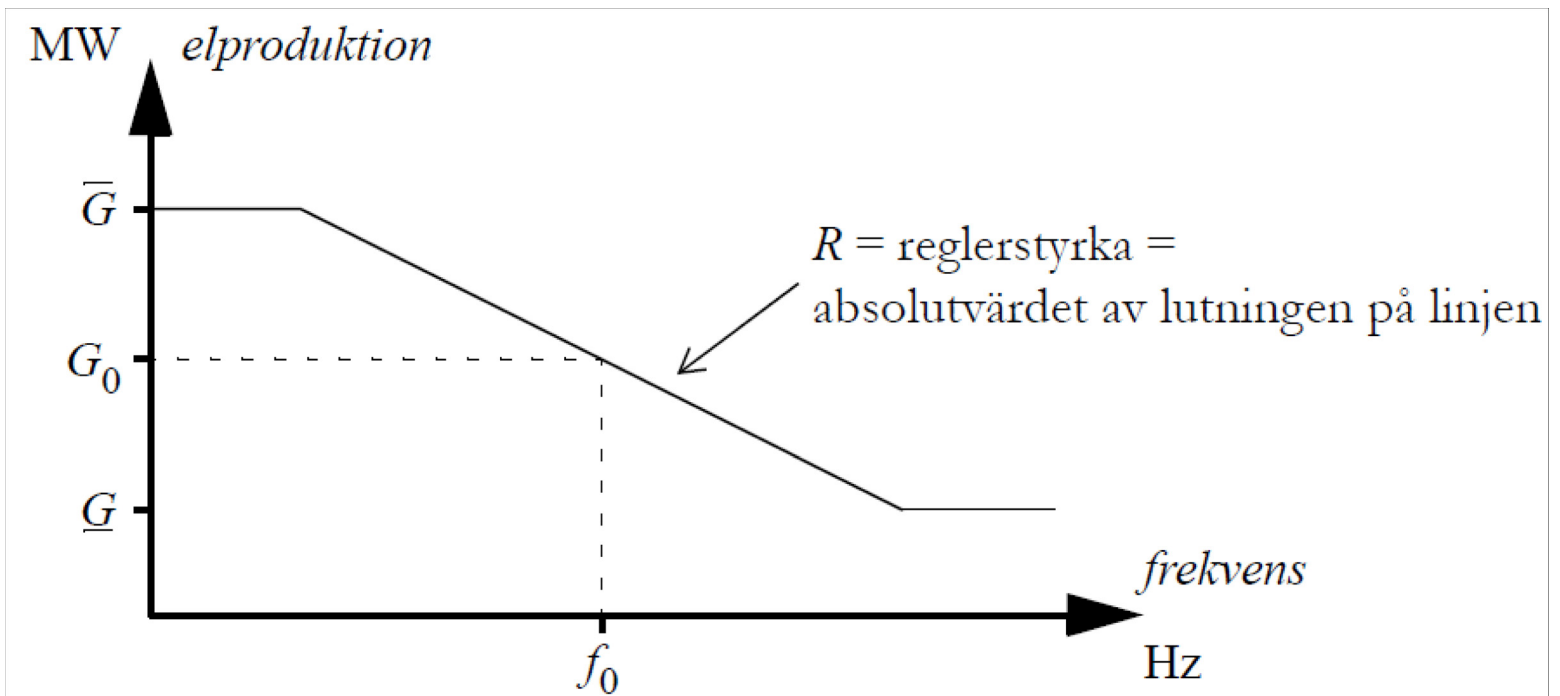
G_0 = basproduktion,

R = reglerstyrka,

f_0 = nominell frekvens.

Oftast är det enklare att endast betrakta ändringarna, d.v.s. $\Delta G = R \cdot \Delta f$, och sedan tänka!

Reglerstyrka



Figur 4.1 Sambandet mellan frekvens och elproduktion i ett reglerstyrkestyrt kraftverk.



Exempel 1

Uppgift

- Elproduktion 1 000 MW
- Last 1 000 MW
- Reglerstyrka 200 MW/Hz
- Frekvens 49.98 Hz.

Vad blir den nya frekvensen om lasten ökar med 10 MW?



Exempel 1

Lösning

- $\Delta f = \frac{\Delta G}{R} = \frac{10}{200} \text{ Hz} = 0,05 \text{ Hz},$
- Lastökning $\Rightarrow$ Frekvensminskning
- Således blir den nya frekvensen

$$f = 49,98 - 0,05 = 49,93 \text{ Hz}.$$



Exempel 2

Uppgift

En minut efter lastökningn i exempel 1 så minskar lasten med 6 MW. Vad blir den nya frekvensen?



Exempel 2

Lösning I

Jämför med situationer **efter** lastökningen i exempel 1, d.v.s

- $\Delta f = \frac{\Delta G}{R} = \frac{6}{200} \text{ Hz} = 0,03 \text{ Hz},$
- Lastminskning $\Rightarrow$ Frekvensökning
- Således blir den nya frekvensen

$$f = 49,93 + 0,03 = 49,96 \text{ Hz}.$$



Exempel 2

Lösning II

Jämför med situationer **före** lastökningen i exempel 1, d.v.s

- $\Delta f = \frac{\Delta G}{R} = \frac{4}{200} \text{ Hz} = 0,02 \text{ Hz},$
- Lastökning $\Rightarrow$ Frekvensminskning
- Således blir den nya frekvensen

$$f = 49,98 - 0,02 = 49,96 \text{ Hz}.$$



Begränsningar i primärregleringen

Då man utformar ett elsystem är det viktigt att ta hänsyn till att det finns begränsningar i primärregleringen:

- Kraftverken som deltar i primärregleringen har begränsade primärregleringsreserver.
- Reglerstyrkan måste vara någorlunda jämnt fördelad i elsystemet, eftersom man annars riskerar att överbelasta transmissionsnätet.



Exempel 4.1

Uppgift

- Elsystem i balans vid nominell frekvens (50 Hz).
- Två reglerstyrkestyrda kraftverk:
 - **Kraftverk 1:** 500 MW installerad effekt, nuvarande elproduktion 420 MW, reglerstyrka 300 MW/Hz
 - **Kraftverk 2:** 100 MW installerad effekt, nuvarande elproduktion 75 MW, reglerstyrka 300 MW/Hz
- Systemet tappar 85 MW elproduktion i ett annat kraftverk.



Exempel 4.1

Lösning

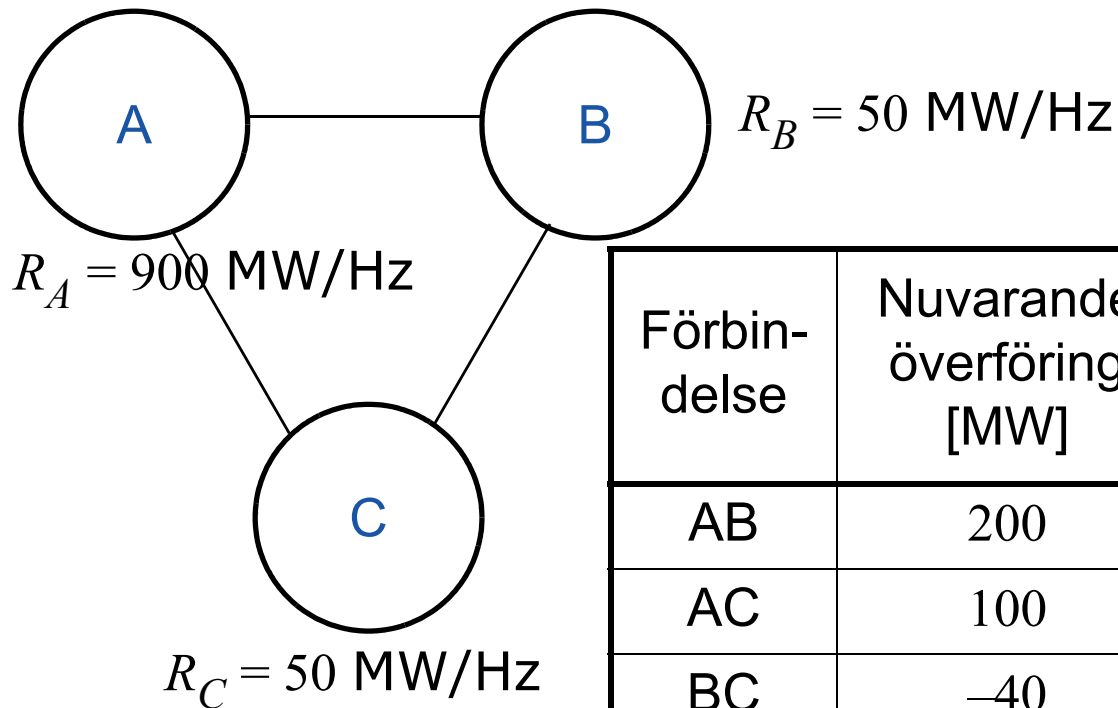
- Samma reglerstyrka $\Rightarrow$ båda kraftverken ökar produktionen lika mycket, d.v.s.

$$85/2 = 42,5 \text{ MW.}$$

- Kraftverk 2 kan endast öka produktionen med 25 MW!
 - Då frekvensen sjunkit till ungefär 49,916 Hz slutar kraftverk 2 att reglera.
- För att återställa balansen måste kraftverk 1 alltså öka elproduktionen med 60 MW.
- $\Delta f = \frac{\Delta G}{R} = \frac{60}{300} \text{ Hz} = 0,2 \text{ Hz.}$
- Ny frekvens $f = 50 - 0,2 = 49,8 \text{ Hz.}$

Exempel 4.2

Uppgift



Förbin- delse	Nuvarande överföring [MW]	Maximal överföring [MW]
AB	200	300
AC	100	150
BC	-40	120

- 240 MW elproduktion kopplas bort i area B.



Exempel 4.2

Lösning

- Elproduktionen måste öka med 240 MW.
- Ökningen fördelas mellan areorna i enlighet med deras andel av den totala reglerstyrkan, $R_{ABC} = 1\,000 \text{ MW/Hz}$.

$$\Delta G_A = \frac{R_A}{R_{ABC}} \cdot 240 = 216 \text{ MW.}$$

$$\Delta G_B = \frac{R_B}{R_{ABC}} \cdot 240 = 12 \text{ MW.}$$

$$\Delta G_C = \frac{R_C}{R_{ABC}} \cdot 240 = 12 \text{ MW.}$$



Exempel 4.2

Lösning

Area A

- Oförändrad last, ökad produktion $\Rightarrow$ ökad export.
- Det finns dock endast 150 MW exportkapacitet kvar $\Rightarrow$ bägge transmissionsförbindelserna kommer så småningom att överbelastas.
- Area A blir isolerat från resten av systemet $\Rightarrow$ exporten minskar med 300 MW (jämfört med före felet i B).

Minskad export är i praktiken samma sak som minskad last!
- Frekvensökning $\Delta f_A = 300/900 = 0,33$ Hz.



Exempel 4.2

Lösning

Area B och C

- Total brist 540 MW (240 MW förlorad produktion, 300 MW förlorad import).
- Samma reglerstyrka $\Rightarrow$ båda areorna ökar elproduktionen med 270 MW.



Exempel 4.2

Lösning

Area C

- Minskad import 100 MW, ökad produktion 270 MW $\Rightarrow$ exporten ökar med 170 MW.
- Endast 80 MW exportkapacitet kvar $\Rightarrow$ transmissionsförbindelsen överbelastas.
- Area C isolerad från resten av systemet $\Rightarrow$ brist 60 MW jämfört med före felet i B (förlorat 100 MW import och 40 MW export).
- Frekvensminskning $\Delta f_C = 60/50 = 1,2$ Hz.



Exempel 4.2

Lösning

Area B

- Area B isolerad från resten av systemet $\Rightarrow$ brist 480 MW jämfört med före felet (förlorat 240 MW import och 240 MW produktion).
- Frekvensminskning $\Delta f_B = 480/50 = 9,6$ Hz.



Exempel 4.2

Lösning

Sammanfattning

- Alla transmissionsförbindelser överbelastade
- Ny frekvens i area A: 50,33 Hz
- Ny frekvens i area B: 40,4 Hz (!)
- Ny frekvens i area C: 48,8 Hz



Primärreglering på konkurrensutsatta elmarknader

Systemoperatören är ansvarig för primärregleringen, men har inte tillräckligt med egen produktionskapacitet. Två lösningar:

- Kräv att producenter tillhandahåller en viss reglerstyrka för att de ska få ansluta sig till nätet.
- Betala producenter för att tillhandahålla reglerstyrka.



Prissättning av primärreglering

Aktörer som tillhandahåller primärreglering kan ersättas för

- tillhandahållen primärregleringskapacitet (€ per MW/Hz)
- utnyttjad primärreglering (€/MWh)
 - Energipriset kan till exempel hämtas från realtidsmarknaden.

Kostnader för primärreglering

Kostnaden för att tillhandahålla primärregleringskapacitet är olika för olika typer av kraftverk.

- **Vindkraft, solenergi:** Icke-reglerbara kraftverk $\Rightarrow$ mycket höga kostnader.
- **Hydro power:** Försumbara bränslekostnader, små verkningsgradsförluster $\Rightarrow$ låga kostnader.
- **Stora termiska kraftverk:** Bränslekostnader, verkningsgradsförluster $\Rightarrow$ höga kostnader.
- **Kärnkraft:** Byggda för att köras på installerad effekt $\Rightarrow$ mycket höga kostnader.
- **Small thermal units:** Bränslekostnader, små verkningsgradsförluster $\Rightarrow$ höga kostnader.



Primärregleringsreserver

Hur mycket reserver som måste hållas för primärregleringen beror på vilka krav man ställer på systemet.

Exempel: Det nordiska elsystemet

- Total reglerstyrka $R = 6\,000$ MW/Hz
- Normaldrift: frekvensen inom 50 ± 0.1 Hz
- De nödvändiga normaldriftreserverna är

$$\Delta G = R \cdot \Delta f = 600 \text{ MW}.$$



Sekundär- och tertiärreglering

Syftet med sekundär- och tertiärreglering är att

- återställa frekvensen till dess nominella värde,
- avlasta utnyttjade primärregleringsreserver,
- minska tidsavvikelsen.

Motsvarar en integrerande regulator (I-regulator) i reglertekniken.



Sekundär- och tertiärreglering

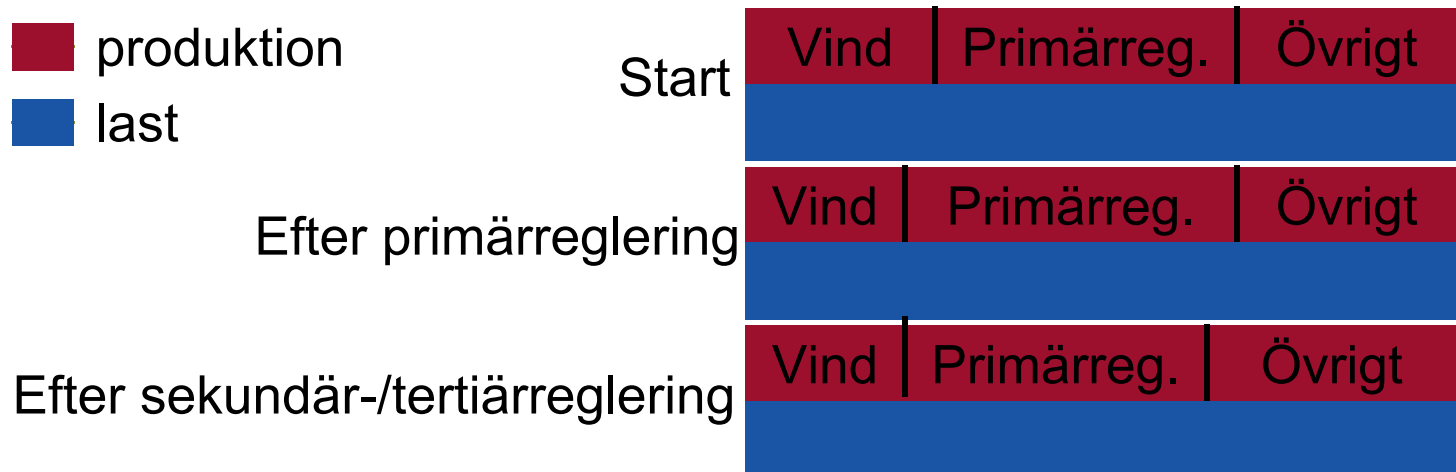
Sekundär- och tertiärregleringen ändrar basproduktionen* i systemet.

- Ändra elproduktionen i kraftverk som inte deltar i primärregleringen.
- Ändra basproduktionen i de reglerstyrkestyrda kraftverken.

* Varmed åsyftas elproduktionen vid nominell frekvens.

Avlastning av primärregleringsreserver

- Om frekvensen är **lägre** än det nominella värdet så behövs ytterligare produktion eller minskad last.
- Om frekvensen är **högre** än det nominella värdet så behövs minskad produktion eller ökad last.



Tidsavvikelse

- Tidsavvikelsen är skillnaden mellan normalt看 och synkron tid (d.v.s. en klocka som styrs av nätfrekvensen).
- I ett 50 Hz-system är tidssavvikelsen under en viss tidsperiod lika med

$$t_i = \int_0^t \frac{(f(\tau) - 50)}{50} d\tau.$$

Reglering av tidsavvikelsen

- För att minska en **negativ** tidsavvikelse måste frekvensen vara högre än det nominella värdet under en tid.
- För att minska en **positiv** tidsavvikelse måste frekvensen vara lägre än det nominella värdet under en tid (oftast inte ett problem).
- Tidsavvikelsen anses inte vara särskilt viktig för driften av elsystemet.



Tidsavvikelse

Exempel

- Nuvarande tidsavvikelse: -2 s.
- Frekvens under de kommande fem minuterna: 50.1 Hz.

Vilken tidsavvikelse kommer man att ha efter denna tidsperiod?

Lösning:

- Varje sekund så löper nätklockan igenom 0.1 extra cykel jämfört med normaltiden.
- Nätklockan knappar in $0.1/50 \cdot 300 = 0,6$ s jämfört med normaltiden.
- Tidsavvikelse efter fem minuter:
 $t_i = -2 + 0,6 = -1,4$ s.



Tidsavvikelse

Praktisk funktion

Tidsavvikelsen kan användas för att beräkna realtidshandeln för en balansansvarig aktör som deltar i primärregleringen:

Exempel:

- Kraft AB är en balansansvarig.
- Under handelsperioden mellan 9:00–10:00 säljer bolaget 3 000 MWh till elbörsen och 3 560 MWh direkt till konsument.



Tidsavvikelse

Praktisk funktion

- Elproduktionen i de av bolagets kraftverk som saknar reglerstyrka var 4 650 MWh.
- Kraft AB har också kraftverk som deltar i primärregleringen:
 - Basproduktion (G_0) 2 000 MW
 - Reglerstyrka (R) 1 000 MW/Hz
 - Bortse från begränsningar i primärregleringsreserver
- Tidsavvikelsen kl. 9:00 är $-0,42$ och tidsavvikelsen kl. 10:00 är $+0.30$.



Tidsavvikelse

Praktisk funktion

- Sambandet mellan frekvens och tidsavvikelse är linjär $\Rightarrow$ Antag konstant frekvens under timmen.
- Nätklockan ändras $(f - 50)/50$ s varje sekund.
- Den totala ändringen under 3 600 s är $+0,72$ s $\Rightarrow f = 50,01$ Hz.
- Vid $f = 50,01$ Hz producerar de reglerstyrkestyrda kraftverken $G = G_0 - R(f - f_0) = 1\,990$ MW.



Tidsavvikelse

Praktisk funktion

- Således köper Kraft AB 10 MWh från systemoperatören under realtidshandeln.
- Obalansen för Kraft AB blir
- during the real-time trading.

$$4\,650 + 1\,990 + 10 - 3\,000 - 3\,560 = 70 \text{ MWh},$$

d.v.s. bolaget måste sälja 70 MWh obalanskraft till systemoperatören.



Frekvensreglering i mindre system

Lastreglering

- Det kan vara bättre att låta primärregleringen styra den elektriska lasten i stället för den mekaniska effekten in till generatorerna.
- Om elproduktionen är större än lasten så ökas lasten i "extralast" (t.ex. en varmvattenberedare).

Exempel: Fristående vattenkraftverk, som alltid körs på installerad effekt.

Frekvensreglering i mindre system

Lastreglering



Kisiizi Hydro Power Plant, Uganda



Frekvensreglering i mindre system

Likströmsproduktion

- Likströmsgeneratorer kan mata ett växelströmsnät via en [växleriktare](#).
- Styrsystem för likströmsgeneratoren och växleriktaren behövs om det inte finns någon synkrongenerator i systemet.

[Exempel:](#) Fristående solcellssystem.