

# Balans och stabilitet i elektriska kraftsystem

Massimo Bongiorno och Daniel Karlsson

Chalmers tekniska högskola

## Sammanfattning

För att hålla balans och stabilitet i ett elektriskt kraftsystem under varierande driftförhållanden och i samband med störningar krävs en del egenskaper hos systemet och dess komponenter. Dessa egenskaper är omsorgsfullt beskrivna av nationella och internationella expertorgan och en omfattande kravställning har arbetats fram i form av europeiska nätkoder och kompletterande regelverk. Reserver och reglerfunktioner handlas till stor del upp i form av så kallade stödtjänster av den systemansvarige för elöverföringssystemet (hos oss Svenska kraftnät). Olika primärenergikällor för elproduktion ansluts på olika sätt till kraftsystemet, främst via synkrogeneratorer (t ex kärnkraft och vattenkraft) och kraftelektroniska omriktare (t ex vindkraft och solkraft). Dessa olika anslutningsgränssnitt har olika egenskaper och regelverken ställer olika krav på synkront anslutna respektive omriktaranslutna produktionsenheter.

- Dock finns det ingenstans något krav på någon miniminivå för andelen synkront ansluten produktion eller någon maximinivå för andelen omriktaransluten produktion (eller vice versa).

Det är fullt möjligt att med nuvarande krav på tillförlitlighet i elförsörjningen driva det svenska kraftsystemet med befintlig vattenkraft och all kärnkraft utbytt mot motsvarande mängd lämpligt dimensionerad omriktaransluten produktion och kompletterande åtgärder för att hantera inertia, t ex rotationsenergi, felbortkoppling och spänningskvalitet. Samtliga sådana kompletterande åtgärder kan klaras med känd teknik till rimliga kostnader. Det återstår att praktiskt demonstrera detta under varierande driftsituationer och för vanligt förekommande driftstörningar.

## Introduktion

Vårt moderna samhälle är helt beroende av tillgång på el av hög kvalitet och hög tillgänglighet. Därför krävs en inbyggd robusthet och reserver av olika slag i elsystemet för att säkerställa de högt ställda tillförlitlighetskraven även vid störningar och ändringar av inmatning eller uttag av el. Det handlar om aktiv och reaktiv effektbalans, i såväl det längre som i det kortare tidsperspektivet, i alla delar av elsystemet.

Eftersom det råder stor enighet om att den svenska vattenkraften i princip är fullt utbyggd, återstår egentligen bara primärenergikällorna vindkraft och kärnkraft för de stora utbyggnadsbehoven som har konstaterats. I den allmänna debatten handlar det ofta om kraftsystemegenskaperna för de olika primärenergikällorna vind respektive uran, medan det ur ett kraftsystemstabilitetsperspektiv är kraftproduktionsmodulens karaktär som är avgörande, dvs om det är en synkronmaskin, såsom är fallet för kärnkraft, eller produktion ansluten via kraftelektroniska omriktare, såsom är fallet för vindkraft.

## Regelverk

Europeiska unionen har via ENTSO-E och Europas samlade expertis på området under flera års tid arbetat fram så kallade nätkoder, som ska uppfyllas av alla aktörer som använder elsystemet. Dessa nätkoder, till exempel [RfG], ställer bland annat krav på all produktion ansluten till det sammankopplade elsystemet. För driften av elsystemet finns en annan nätkod [SOGL]. Till dessa nätkoder ger Energimarknadsinspektionen ut kompletterande nationella föreskrifter med

preciseringar av vissa krav, såsom EIFS 2018:2 [EIFS]. Ingen av dessa nätkoder gör skillnad på kärnkraft och vindkraft, dock ställs olika krav på synkrona produktionsmoduler och på produktionsmoduler anslutna via kraftelektroniska omriktare.

- Men ingenstans i dessa omsorgsfullt utarbetade regelverk, för säkerställande av driftsäkerheten i de europeiska och i de svenska elsystemen, finns något som helst krav på proportioner mellan de olika typerna av produktionsmoduler.

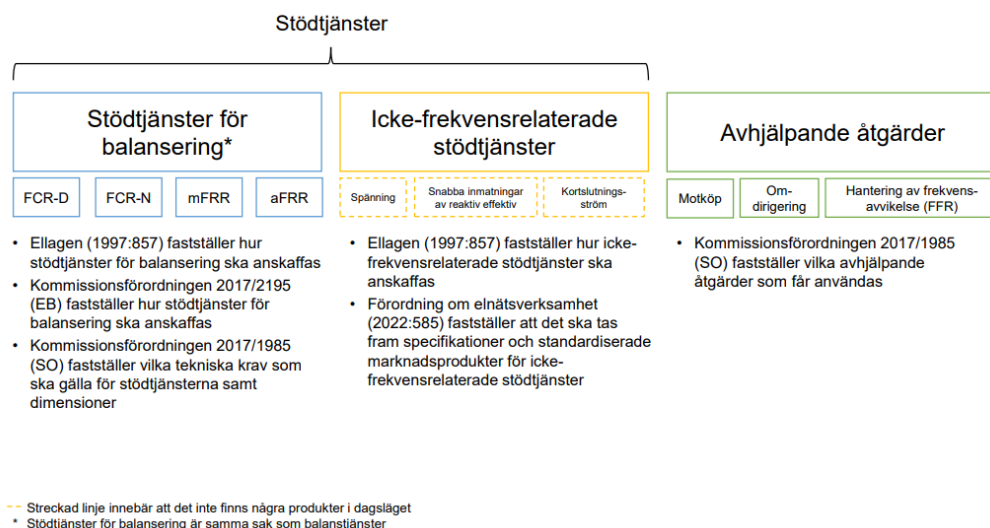
- Inte heller Svenska kraftnät, som är systemansvarig för överföringssystemet, systemansvarig myndighet och transmissionsnätsföretag, med ett stort ansvar för att det svenska överföringssystemet för el är hållbart, säkert och kostnadseffektivt, anger några principiellt baserade krav på relationen mellan kärnkraft och vindkraft eller mellan synkron och omriktaransluten produktion.

Svenska kraftnät följer upp tillämpningen och efterlevnaden av EU:s regelverk, genom att på olika sätt verifiera karvuppfyllnad och redovisade status till regeringen i en särskild rapport [SVK].

## Stabilitetskrav i elsystem

Ett stabilt elsystem måste kunna hantera förändringar i elproduktion respektive i elanvändning och också kunna hantera störningar av olika slag i elsystemet, antingen de uppstår internt till följd av fel i någon komponent i systemet eller till följd av yttre påverkan. Därför har systemdriftsansvarig för överföringssystemet (hos oss Svenska kraftnät) ett antal stödtjänster och avhjälpande åtgärder till sitt förfogande för att kunna hantera störningar och avvikelser, se Figur 1. Stödtjänster är främst frekvensrelaterade och handlar om att med olika snabbhet öka eller minska inmatningen av aktiv effekt för att stabilisera kraftsystemet. Stödtjänster ska upphandlas på marknadsmässiga villkor, medan avhjälpande åtgärder hanteras på annat sätt.

- Inte heller när det gäller stödtjänster eller avhjälpande åtgärder finns någon koppling till karaktären på de enheter som bidrar med de olika stödtjänsterna. För respektive stödtjänst finns krav på snabbhet och stabilitet [FCR, FFR].



Figur 1 Stödtjänster och avhjälpande åtgärder [källa Svenska kraftnät]

Varken dagens kärnkraft eller dagens vindkraft bidrar med stödtjänster för balansering. Både kärnkraft och vindkraft skulle kunna bidra med sådana tjänster. För vindkraften gäller då att nedreglering är relativt billig och kan åstadkommas rimligt snabbt, medan uppreglering kräver att man i utgångsläget varaktigt "spiller" vind, för att kunna vrida bladen och öka uteffekten om så skulle påkallas. Både kärnkraft och vindkraft kan enkelt bidra med både spänningsreglering och snabb

inmatning av reaktiv effekt. Kortslutningsström, däremot, kommer naturligt från synkronmaskinen, medan en rimligt dimensionerad omriktare för en vindkraftpark endast bidrar med en kortslutningsström som är c:a 150 % av aktiv märkström. En omriktare är dock väsentligt snabbare än en synkronmaskin när det gäller spänningsreglering och kan dessutom bidra till spänningssymmetri, genom fasseregulerad kompensering, vilket inte är möjligt med en synkronmaskin. Varken kärnkraft eller vindkraft kommer normalt i fråga för avhjälpande åtgärder.

Det finns även andra krav för upprätthållande av stabil drift som historiskt sett alltid har funnits mer eller mindre "per automatik", såsom inertia, eller rotationsenergi, som via en inneboende tröghet skapat ett tidsutrymme för att aktivt vidta regleråtgärder för att återställa en obalans. Denna energibuffert har hittills tillhandahållits av rotationsenergin i anslutna synkronmaskiner. En motsvarande energibuffert kan mycket väl tillhandahållas av batterier eller superkondensatorer anslutna till kraftsystemet via omriktare.

Det har sedan länge funnits krav på att stora synkronmaskiner aktivt ska bidra till dämpning av spontant, eller på annat sätt, uppkomna systemvida pendlingar, till exempel i frekvensområdet 0,25-1 Hz. Sådana dämpfunktioner är lättare att åstadkomma med hjälp av en kraftelektronisk omriktare än med en synkronmaskin. Vidare finns möjlighet att med en omriktare individuellt styra de olika faserna och på så sätt bidra till symmetrering av systemet.

ENTSO-E beskriver i olika dokument [HP, GFC] hur kravställningen ska se ut på omriktaransluten produktion för att garantera systemstabiliteten vid hög andel icke synkron generering. Man definierar ett antal (totalt 7 st) så kallade "grid-forming" egenskaper som åtminstone vissa produktionsenheter måste ha. En tillräckligt stor andel av produktionskapaciteten måste ha dessa "grid-forming" egenskaperna.

I Tabell 1 nedan görs ett försök att räkna upp nödvändiga systemstabiliserande egenskaper och hur de realiserar för olika kraftslag och produktionstekniker/anslutningsgränssnitt.

Tabell 1: Nödvändiga systemegenskaper så kallade "grid-forming" egenskaper och hur de realiseras

Nödvändig systemegenskap	Realisering för kärnkraft med synkronmaskin	Realisering för omriktaransluten vindkraft	Komplettering för omriktaransluten vindkraft / kommentar
Spänningshållning / spänningsreglering / reaktiv effektproduktion	Traditionell spänningsreglering med statisk eller roterande matare med spänningsregulator	Spänningsreglering med omriktaren.	Ingen komplettering nödvändig. Det handlar bara om att dimensionera omriktaren
Kortslutningseffekt / felströmsinmatning	Felströmmen c:a 5 gånger märkströmmen från en synkronmaskin	Felström c:a 1,5 gånger den aktiva märkströmmen	I transmissionsnätet behövs ingen exceptionell felström för felbortkoppling.
Rotationsenergi / inertia / tröghet	Rotationsenergi hos rotorn	Kan lösas med energilager och reglerkrets	Fristående energilager, superkondensatorer eller batteri, med omriktare
Automatisk underfrekvensstyrd förbrukningsfrånkoppling	Inte relevant	Inte relevant	
Dämpning av övertoner och mellantoner i spänningen	Normalt inte möjligt	Kan göras med omriktare	Filter eller dämpning direkt med omriktaren
Symmetrering av spänningsobalanser	Normalt inte möjligt	Individuellt styrda fasspänningar gör symmetreringen enkel	
Dämpning av naturliga och reglersysteminitierade pendlingar	Dämp tillsats på spänningsregulatorn	Dämp tillsats på spänningsregulatorn	

## Dödnätsstart och systemuppbyggnad

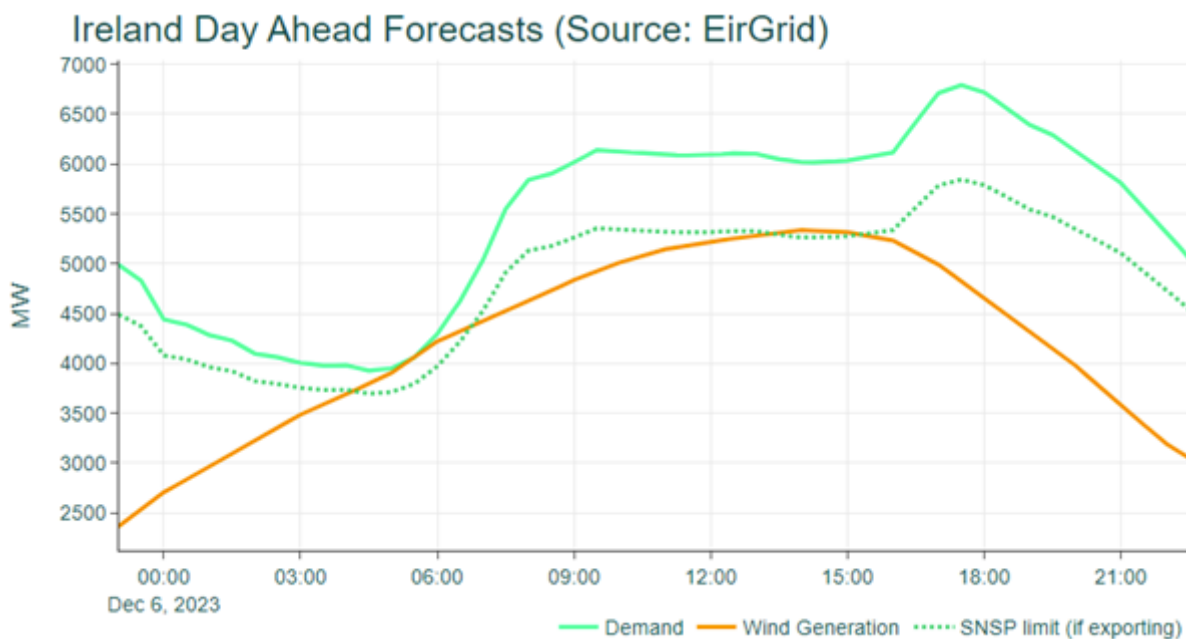
För en tillförlitlig elförsörjning krävs, förutom robusthet i ett i drift varande elsystem, även möjligheter att dödnätsstarta ett system efter total spänningslöshet och att kunna bygga upp elsystemet till normala driftförhållanden. En dödnätsstartande produktionsenhet kan starta igång enheten och spänningssätta ett anslutande nät, upprätthålla nöjaktig spänning och frekvens, samt öka eller minska elutmatningen i tak med att elförbrukning kopplas till eller ifrån, utan extern elkraftförsörjning för produktionsenhetens hjälpkraftbehov för att driva pumpar, fläktar, kontrollutrustning och liknande. En dödnätsstartande anläggning ska även kunna synkroniseras (fasas) med andra redan driftsatta anläggningar eller system.

## Erfarenheter från andra system

Redan 2015 stod vindkraften för 42 procent av Danmarks elkonsumtion. På Fyn och Jylland hade man 1460 timmar under året då vindkraftproduktionen översteg elförbrukningen. Den 26 juni mellan

klockan 6 och 7 på morgonen översteg vindkraftproduktionen i Danmark förbrukningen med 38,9 %. Jylland och Fyn är förvisso sammankopplade med det centraleuropeiska systemet och Själland är kopplat till Sydsverige, men dessa kopplingar är knappast starkare än Sydsveriges koppling till vattenkraften i Norrland och i Norge. [DK]

Irland (inklusive Nordirland) bildar ett eget elsystem, som inte är synkront sammankopplat med något annat större system. Irland har alltid legat långt framme när det gäller integration av vindkraft i stor omfattning. Under november 2023 producerades 43 % av all el från förnybara källor (vind, sol, vatten). Redan nu kan 75 % av Irlands elproduktion komma från icke-planerbara energikällor, såsom sol och vind, vilken drifttimme som helst. Ambitionen är att öka denna andel till 95 % år 2030. Den 18 januari 2024 noterades en rekordförbrukning på 5577 MWh/h och i december 2023 noterades rekord i vindkraftproduktion om 4653 MW. [EG1, EG2]



Figur 2 Prognos för elförbrukning och vindkraftproduktion i det irländska systemet, den 6 december 2023 [ER3]

National Grid ESO i Storbritannien arbetar med krav på minimum Grid Forming Capability [ESO]

I Tyskland nådde den förnybara elproduktionen 55 % under 2023 och man siktar på 80 % år 2030 [GE1]. Produktionsrekordet från vindkraft är drygt 53 000 MW och inträffade den 22 december 2023. Genomsnittsproduktionen för den dagen blev 47 600 MW, vilket täckte 85 % av Tysklands elbehov [GE2]. Högsta elförbrukningen någonsin i Tyskland uppgick till 83 260 MW och inträffade i oktober 2019 [GE3].

Tyska regelverk [VDE] börjar ställa krav på att system för högspänd likström ska kunna bidra till dämpning av såväl systemvida pendlingar i anslutande växelströmssystem, i frekvensområdet 0,1 till 2 Hz, som av subsynkrona oscillationer. Vidare ställs krav på att omriktaranläggningar ska kunna bidra till fassymmetrering i fall där anslutande nät uppvisar fassymmetri.

Gotland har c:a 180 MW vindkraft installerat. Vindkraften svarar för c:a hälften av energibehovet på årsbasis och blåsiga dagar kan vindkraften svara för hela Gotlands elbehov [EM]. Gotland har två tyristorbaserade HVDC länkar till fastlandet, var och en med en kapacitet på 160 MW. Svenska kraftnät planerar för två nya växelströmsförbindelser till Gotland om 220 kV och 220 MW vardera, att tas i drift 2031 [SVK2]. I HVDC stationen i Ygne finns två synkronkompensatorer om vardera 70 MVA

som bidrar med rotationsenergi och felströmsinmatning på ön. Frekvenshållningen på ön sköts av HVDC länken och synkronkompensatorerna begränsar frekvensderivatan vid plötsliga obalanser [UU]. 2018 hade ön 13 totalavbrott och 2019 har vi upplevt 5 totalavbrott, enligt statistik från GEAB [RD]. Bortfall av en av synkronkompensatorerna är den enskilt största orsaken till strömavbrott på hela Gotland [UU, Christer Liljegren].

## Slutsatser

Det är fullt möjligt att med nuvarande krav på tillförlitlighet i elförsörjningen driva det svenska kraftsystemet med befintlig vattenkraft och all kärnkraft utbytt mot motsvarande mängd lämpligt dimensionerad omriktaransluten produktion och kompletterande åtgärder för att hantera inertia, felbortkoppling och spänningskvalitet. Samtliga sådana kompletterande åtgärder kan klaras med känd teknik till rimliga kostnader.

## Appendix

Appendix A: Fortsatt arbete för detaljerade verifieringar av balanserande egenskaper

Appendix B: En enkel beräkning av kraftsystemets rotationsenergi

## Referenser

- DK [New record-breaking year for Danish wind power \(archive.org\)](#)
- EG1 [New record for wind energy on all-island grid \(eirgrid.ie\)](#)
- EG2 [Ireland records new record peaks for electricity demand due to cold weather \(eirgrid.ie\)](#)
- EG3 [New record for Irish Wind Generation! - ElectroRoute](#)
- EIFS [Energimarknadsinspektionens föreskrifter om fastställande av generellt tillämpliga krav för nätanslutning av generatorer \(ei.se\)](#)
- EM [Microsoft Word - Gute utkast v1.25 EnergiM.docx \(energimyndigheten.se\)](#)
- [ESO] [download \(nationalgrideso.com\)](#)
- FCR [Technical Requirements for Frequency Containment Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area \(statnett.no\)](#)
- FFR [Technical Requirements for Fast Frequency Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area – External document \(statnett.no\)](#)
- GE1 [Renewable energy's share on German power grids reaches 55% in 2023 | Reuters](#)
- GE2 [German wind power output surges to record high 53 GW | Montel \(montelnews.com\)](#)
- GE3 [Germany: peak hourly electricity load 2023 | Statista](#)
- GFC [Grid-Forming Capabilities: Towards System Level Integration \(entsoe.eu\)](#)
- HP [High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources \(HPoPEIPS\) \(entsoe.eu\)](#),
- RD [Elförsörjningen på Gotland \(Skriftlig fråga 2019/20:348 av Lars Thomsson \(C\)\) | Sveriges riksdag \(riksdagen.se\)](#)

- RfG [KOMMISSIONENS FÖRORDNING \(EU\) 2016/ 631 - av den 14 april 2016 - om fastställande av nätföreskrifter med krav för nätanslutning av generatorer \(europa.eu\)](#)
- SOGL [KOMMISSIONENS FÖRORDNING \(EU\) 2017/ 1485 - av den 2 augusti 2017 - om fastställande av riktlinjer för driften av elöverföringssystem \(europa.eu\)](#)
- SVK [Implementeringen av EU-regelverk på Svenska kraftnät \(svk.se\)](#)
- SVK2 [Svenska kraftnät bygger ut transmissionsnätet till Gotland | Svenska kraftnät \(svk.se\)](#)
- UU [FULLTEXT01.pdf \(diva-portal.org\)](#)
- VDE VDE-AR-N 4131 Technical Rules for the Connection of HVDC Systems and Generation Facilities Connected via HVDC Systems (TAR HVDC) [Engelsk översättning]  
[Technical Connection Rule \(TCR\) VDE-AR-N 4131 creates a basis for low-loss integration of offshore wind energy](#)

## Appendix A

### Fortsatt arbete för detaljerade verifieringar av balanserande egenskaper

#### **Övergripande frågeställningar att hantera:**

- Det känns angeläget att teoretiskt beräkna och praktiskt demonstrera behovet av systemtröghet för att hantera vattenturbinernas egenskap att först minska drivmomentet innan momentet ökar vid en pådragsökning. Det är särskilt viktigt att undersöka om det finns ett lägsta värde på rotationsenergin som måste finnas tillsammans med den artificiella rörelseenergin som kan åstadkommas med kraftelektronik och lämplig styrning.
- Det är vidare viktigt att studera konsekvenserna av den minskade kortslutningseffekten på transmissionsnättnivå.

#### **Exempel på mer detaljerade frågeställningar att hantera:**

- Det måste säkerställas att befintliga automatiker för brytarkopplade shuntkondensatorer och shuntreaktorer fungerar när kortslutningsströmmarna minskar. Sådana problem har uppträtt i samband med någon enstaka driftstörning. I något känt fall bedömdes det vara nödvändigt att ersätta en stor mängd överströmsskydd mot distansskydd när inmatning från synkronmaskiner skulle ersättas med elförsörjning från omriktare via sjökabel från ett stort kraftsystem med höga kortslutningsströmmar.
- Det är också nödvändigt att säkerställa att befintliga distansskydd får tillräcklig ström för att detektera kortslutningar och jordslutningar i de fall man förlitar sig på reservbortkoppling från distansskydd av fel utanför den primära skyddszonen. Äldre distansskydd behöver cirka 20 % av skyddets märkström för att ge pålitlig funktion. Modernare skydd behöver inte lika hög ström som äldre skydd, men saken måste undersökas.

#### **Praktiska prov:**

- Det är viktigt att utarbeta förslag på praktiska prov och ta fram provprogram för att demonstrera "att det är fullt möjligt.....", där fokus i första hand läggs på hantering av konsekvenser av den minskade rotationsenergin och den minskade kortslutningseffekten.



## Appendix B

### En enkel beräkning av kraftsystemets rotationsenergi

Beräkningen nedan är tänkt att ge en övre gräns för tillgänglig rotationsenergi i det svenska kraftsystemet i frekvensintervallet 50,0 till 49,0 Hz, som är en kritisk undre frekvensgräns för att med marginal undvika underfrekvensstyrd förbrukningsfrånkoppling. Den prognoserade framtida produktions-/belastningsnivån är väsentligt högre, och kan påverka behovet av systemtröghet.

Antag en relativt hög produktionsnivå: 25 000 MW (all time high är 27 000 MW, den 5/2 2005)

Anta en genomsnittlig inertia-konstant, H: 7 s (egentligen ett för högt värde)

Den totala rotationsenergin beräknas då till:  $7 \times 25\,000 = 175\,000$  MWs (som är ett högt värde)

Rotationsenergin är proportionell mot kvadraten på varvtalet, dvs  $W_k = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$

Nästa steg blir att uppskatta den frigjorda rotationsenergin när frekvensen sjunker från 50 till 49 Hz, vilket är en frekvensändring om 2 %, som då motsvarar en ändring av rotationsenergin med c:a 4 %.

Den frigjorda energin motsvarar:  $0,04 \times 175\,000$  MWs = 7 000 MWs = **2 MWh**

Det handlar alltså om ca 2 MWh i tillgänglig rotationsenergi. Denna mängd är enkel att upprätthålla i superkondensatorer eller batterier. Antag att dessa 2 MWh ska injiceras i kraftsystemet inom en tidsrymd av 5 sekunder, för att hejda frekvensfallet omedelbart efter ett stort produktionsbortfall. Behovet av tillgänglig injicerings effekt kan då enkelt beräknas.

Injicerings effekt:  $7\,000$  MWs / 5 s = **1400 MW**, vilket motsvarar en stor produktionsenhet

**Slutsats:** Energibehovet är måttligt, men effektkbehovet är ganska stort.

**Kommentar:** Det är nödvändigt, av redundans och tillgänglighetsskäl, att sprida ut enegiinjiceringen på flera enheter och det är lämpligt att sprida ut den på många enheter. Det kan företrädesvis vara enheter som även används för andra uppgifter i kraftsystemet