



Teknik för smarta elnät för själva elnäten
Kartläggning och behovsanalys

Rapport till Samordningsrådet för smarta elnät

Elforsk



NEPP report

April 2014



Teknik för smarta elnät för själva elnäten – kartläggning och behovsanalys

Förtext

Denna rapport har en teknisk utgångspunkt med ett visionärt anslag. Den spänner mellan vidareutveckling av befintliga lösningar till teknik som inte finns idag. Det är viktigt att tänka på att framtida teknik endast har ett berättigande i de fall de uppfyller ekonomiska, miljömässiga och andra krav. Dessutom torde utveckling av sådan ny teknik bero av de behov som kan identifieras och den nytta tekniken kan förväntas ge.



Sammanfattning med rekommendationer

Rapporten analyserar teknik för smarta elnät med utgångspunkt i några konkreta exempel och har följande förslag till nationella satsningar:

Skapa ett samlat program för utveckling av teknik för smarta elnät för tillämpning i befintliga elnät.

Programmet syftar till innovationer och kommersialisering samt till anknuten forskning. Denna forskning tar utgångspunkt i den kraftsystemanalys och det relaterade vetande som behövs för att åstadkomma tekniken för smarta elnät inklusive programvaror och informationsteknik. Det kan exempelvis handla om och hur stamnätet ska kunna användas närmare sina gränser för energiöverföringen genom att använda mätdata insamlade över ett stort geografiskt område. För detta krävs kunskap om hur kraftsystemet fungerar. Det kan även handla om hur elavbrott ska förebyggas och göras kortvarigare exempelvis genom avancerad analys av elektriska signaler i distributionsnät. Viktigt är att förankra forskningen i verkliga utmaningar där ett aktivt samarbete mellan leverantörer av elkraft- och informationstekniska varor och tjänster, elnätsföretag och tekniska högskolor är central för tillämpningen av resultaten.

Skapa en nationell samverkansplattform för utveckling av teknik för framtidens transnationella och interkontinentala transmissionsnät.

Utveckling av teknik för framtida transmissionsnät utformade med likströmsteknik skulle kräva stora satsningar på forskning. Här har Sverige särskilda möjligheter till export. Därför föreslås en nationell satsning för att möjliggöra kabelteknik för elnät med högspänd (1 MV) likström. Samverkansplattformen ska öka samarbetet mellan aktörerna från industrin, akademien och energiföretagen. Målet är en ökning av innovationer som i sin tur leder till produkter och arbetstillfällen.

Båda rekommendationerna bygger vidare på områden där Sverige har särskilda styrkor inom tillverkande industri, energiföretag och akademien.



Uppgiften

Detta arbete har utgångspunkt i frågan – Vilken är morgondagens teknik i de smarta elnäten? Svaret på frågan är exempel på teknikutveckling som möjliggör det smarta elnätet. Tekniken begränsas till nyttor för själva elnäten, det vill säga att elanvändning eller styrbar elproduktion balanseras så att den anpassas efter tillgången på el från flödande energikällor är inte en del av framställningen, förutom när en sådan flexibel elanvändning direkt påverkar själva elnätets förmåga att överföra energi.

Målet med uppdraget har varit att beskriva vilka nya funktioner som är aktuella för och vilka nya krav som kommer att ställas på det framtida smarta elnätet. Utgångspunkten är exempel på tekniker som bedöms kunna få särskild betydelse för utvecklingen.

Projektorganisation

Följande personer har medverkat i projektet:

- Giorgios Demetriades, ABB
- Sture Larsson, tidigare Svenska kraftnät
- Anders Richert, Svensk Energi
- Lennart Söder, KTH
- Carl Johan Wallnerström, KTH
- Stefan Montin, Elforsk
- Magnus Olofsson, Elforsk (sammanhållande)

Projektgruppen har sammanträtt vid möten och har i övrigt kommunicerat via e-post. Arbetet har avrapporterats till beställaren Samordningsrådet för smarta elnät genom muntliga presentationer baserat på vid tillfället tillgängligt material.



Om att mäta, analysera och styra

Utgångspunkten för exemplen har varit att det vanligtvis finns tre komponenter i tillämpningarna som inbegriper att mäta, att analysera respektive att styra. Se Figur 1.

- **M**äta
- **A**analysera
- **S**tyra

Figur 1. De tre komponenterna i varje exempel.

Mäta innebär att givare används för att mäta elektriska eller andra storheter. Här avses mätning som sker automatiskt där mätvärdena överförs till datorer. Analysera innebär att datorers programvaror analyserar mätdata och styra innebär att datorerna skickar signaler till vanligen elektriskt styrbar utrustning.

Att mäta, analysera och styra i elektriska energisystem är i sig inget nytt. Det finns många sådana tillämpningar sedan årtionden tillbaka i tiden. Dessa tillämpningar har dock i allmänhet skett lokalt. Exempelvis genom att dämpa oönskade snabba förändringar i energiflödet mellan generatorer och elsystemet i övrigt, så kallade effektpendlingar. Det har gjorts, och görs alltjämt, genom utrustning som söker dämpa pendlingarna genom att mäta, analysera och styra generatorn lokalt. Analysen har dessutom skett utan att förändringar i elsystemet har kunnat tas i beaktande just för att lösningen varit geografiskt lokal.

En viktig möjlighet som kommer med den nya informationstekniken är att mer än tidigare mäta på en eller flera geografiska platser i elnätet, att analysera mätvärden i en eller flera datorer och att styra en eller flera utrustningar i det elektriska energisystemet som kan befinna sig på geografiskt långt avstånd från mätplatsen/mätplatserna. Det finns även fall där styrning sker indirekt genom att en människa får ta del av analysen som i sin tur påverkar, styr, utrustning för att uppnå en önskad förbättring. Här ger teknik för smarta elnät nya värdefulla möjligheter.



Teknikmognadsnivåer

Klassificering har även gjorts efter teknikmognadsgrad (TMN) och efter vilka resultat som förväntas uppnås; se Figur 2. Resultat har delats in i fyra huvudgrupper.

		Resultat			
		R 4: Integrering av el från flödande energikällor över mycket stora avstånd	R 3: Färre och kortare elavbrott	R 2: Överföring på elnät närmare verkliga gränser	R 1: Tillräcklig elkvalitet trots mycket vindkraft och sol
Teknikmognadsnivå – TMN	TMN 9: Kommercialisering				
	TMN 7-8: Produktutveckling				
	TMN 5-6: Teknisk verifiering, demonstration				
	TMN 3-4: Tillämpad grundforskning				
	TMN 1-2: Grundforskning				

Figur 2. Teknikmognadsnivåer och utmaningar¹

¹ Samma teknikmognadsnivåer som används i rapport från Ramböll: Smart Grid Forskningsprojekt i Sverige. Kartläggning april – juni 2013.
http://www.swedishsmartgrid.se/wp-content/files_mf/1390831893RamböllRapportKartläggningavSmartGridforskningsprojektSverige_slutversionjuni2013.pdf.



Exemplen

I beskrivningen av exemplen har ett enkelt språk eftersträvats där fackuttryck så långt möjligt undvikits. Målgruppen är energikunniga läsare utan djupare kunskaper i elkraftteknik.

Samtliga resultat redovisas i en separat presentationsfil i PowerPointformat, se bilaga 1 till detta dokument. Till varje exempel hör en klassificering av teknikmognadsnivå och resultat enligt beskrivningen i Figur 2.

Slutsatser i fyra dimensioner

Med utgångspunkt i de lämnade exemplen ges här slutsatser baserat på fyra centrala frågeställningar.

VILKA NYTTOR GER TEJNIKEN FÖR DET SMARTA NÄTET?

En beskrivning av syftet med elektriska energisystem och relevanta frågeställningar för tekniker för smarta elnät ges i bilaga 2. Nedan följer en sammanfattande beskrivning av nyttor med teknik för smarta elnät ur ett elnätsperspektiv.

Av exemplen i bilaga 1 framgår att teknik för smarta elnät bland annat kan bidra till

1. tillräcklig elkvalitet trots mycket vindkraft och solet,
2. överföring av energi på elnät närmare verkliga gränser,
3. färre och kortare elavbrott samt
4. integrering av el från flödande energikällor över mycket stora avstånd.

Befintliga elnät

För **befintliga elnät** kan tekniken ge möjlighet att öka utbyggnaden av elproduktion från i första hand de flödande energikällorna sol och vind utan att elnäten byggs om eller förstärks. Därtill kan elnäten utnyttjas närmare sina tekniska gränser med bibehållen tillförlitlighet.

Tillräcklig elkvalitet² kan nås genom att spänningar mäts automatiskt i flera punkter i elnäten och genom att datorer efter analys av mätningarna styr utrustningar³ som påverkar

² Till exempel genom att spänningen inte avviker för mycket från 230 volt i elnäten.

³ Exempelvis så kallade lindningskopplare i transformatorer.



spänningen i elnätet. Det är särskilt intressant för att möjliggöra anslutning av en stor andel vindkraft och solet.

Ledningar, transformatorer och andra utrustningar har normalt maximala gränser för strömbelastningar. Genom att mäta temperaturer på ledningar, i transformatorer etc. kan den maximala strömmen tillåtas variera. Med teknik för smarta elnät görs detta automatiskt med användande av givare och datorer. I elsystemet finns en lång rad begränsningar relaterade till stabilitet där den nya tekniken kan medverka till högre överföring av energi med bibehållen tillförlitlighet.

Elavbrott kan förebyggas genom underhållsteknik som bygger på mätningar på flera ställen i elnäten och informationstekniska system. När elavbrott väl uppstått kan teknik för smarta elnät bidra till snabbt återställande och därmed kan avbrottstiderna hållas nere.

Nästa generations transmissionsnät

Idag och inom överskådlig framtid är växelström den helt förhärskande tekniken i alla världens transmissionsnät. Likström har använts vid speciella behov som att koppla samman stora elsystem med mindre och vid längre vattenpassager. Likströmsledningarna har då begränsats till förbindelser mellan två punkter i växelströmsnätet.

Teknik för smarta elnät möjliggör nu helt **nya elnät** med likström i flera sammankopplade ledningar. Sådana elnät finns alltså inte idag. Dessa elnät kan vara **transnationella** eller utgöra delnät i befintliga växelströmsnät beroende på vilka behov som finns. Genom utveckling av brytare för likström⁴ kan likströmsledningar kopplas samman med varandra. Upstår kortslutning på en ledning kan genom likströmsbrytarna bara denna kopplas bort medan det övriga likströmsnätet är intakt. Det har hittills inte varit möjligt i likströmsnät på samma sätt som i elnät för växelström.

Genom utveckling av komponenter som tål högre spänning kan transnationella elnät öka möjligheten att integrera och överföra el från fritt flödande energikällor över mycket stora avstånd. Den relativa variationen i elproduktion och elanvändning minskar över större geografiska områden. I öst-västlig riktning kan dygnsvariationer spridas ut. Vattenkraftens utjämnande förmåga kan nyttiggöras bättre i ett geografiskt utbrett elnät med hög kapacitet.

Utbredda transmissionsnät kan helt eller delvis byggas med kabel för likström. Kablar är inte praktiskt möjliga att använda för växelström vid höga spänningar några längre sträckor. Det beror på den ström som uppstår genom den ständiga och snabba upp- och urladdning av

⁴ <http://www.technologyreview.com/featuredstory/513736/supergrids/>



kabeln som sker i takt med växelspänningens frekvens. Vid likspänning sker uppladdning endast vid inkoppling av kabeln och det kan ske långsamt.

Kablar har fördelar i förhållande till vanliga kraftledningar, luftledningar, som i många fall anses oönskade i landskapet – inte minst i och nära tätorter.

Här har Sverige särskilt goda möjligheter att ta ledningen i utveckling av den utrustning som behövs i form av likströmsbrytare, kraftelektronik samt kablar med tillräckliga prestanda..

Men kan det vara ekonomiskt rationellt med ett nytt överordnat transnationellt transmissionsnät? I en färsk rapport från Greenpeace visas fördelarna med ett överordnat transnationellt europeiskt elnät⁵. Det skulle möjliggöra en kraftfull ökning av förnybar elproduktion och påstås vara en mer kostnadseffektiv väg i jämförelse med den pågående förstärkningen av nationella elnät med utlandsförbindelser. Det finns andra analyser som visar på fördelarna med ett överordnat europeiskt elnät⁶ och även i Asien⁷. Förutom ekonomiska och tekniska utmaningar finns förstås en lång rad politiska sådana. Gasnät är sedan länge interkontinentala,. Så frågan är om och i så fall när vi kan se ett globalt elnät växa fram.

⁵ Rapporten [PowE\[R\] 2030 – A European Grid for 3/4 Renewable Energy by 2030](http://www.greenpeace.org.uk/media/reports/power-2030-european-grid-3/4-renewable-energy-2030).

<http://www.greenpeace.org.uk/media/reports/power-2030-european-grid-3/4-renewable-energy-2030>.

⁶ Se exempelvis [Roadmap 2050 – a closer look. Cost-efficient RES-E penetration and the role of grid extensions](http://www.tillvaxtanalys.se/sv/om-tillvaxtanalys/verksamheten/innovation-och-globala-motesplatser/utlandsverksamhet/global-utblick/2014-02-10-international-symposium---roadmap-to-asia-super-grid.html).

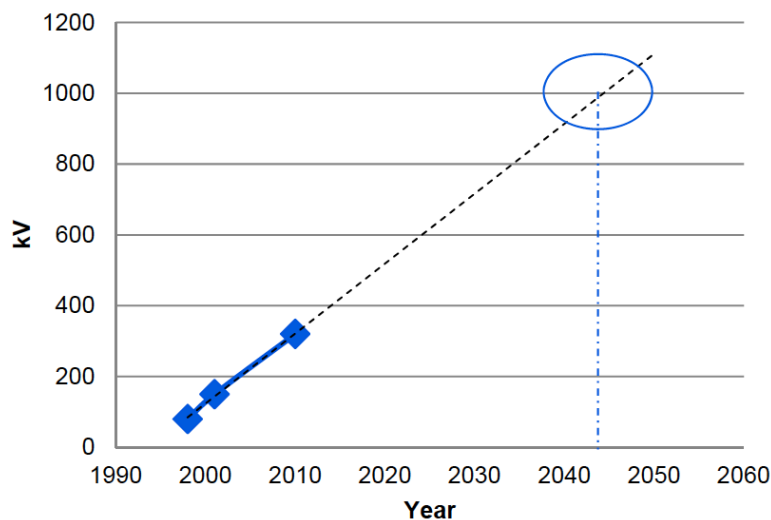
⁷ <http://www.tillvaxtanalys.se/sv/om-tillvaxtanalys/verksamheten/innovation-och-globala-motesplatser/utlandsverksamhet/global-utblick/2014-02-10-international-symposium---roadmap-to-asia-super-grid.html>



HUR SER TEKNIKLÄGET OCH TEKNIKMOGNADEN UT IDAG?

En stor del av tekniken för smarta lösningar för befintliga elnät finns tillgänglig i sina beståndsdelar. Det som ofta fattas är förmågan att skapa enkla och robusta lösningar som kan kommersialiseras. För flera tillämpningar, särskilt på transmissionsnätets nivå, är utveckling av programvaror central. För detta krävs djup kunskap om elektriska energisystem.

Linear extrapolation



Figur 3. Spänningsprestanda för polymeriserade (plastiserade) kablar för likström med extrapolering med dagens utvecklingstakt. Källa: ABB.

Nya transmissionsnät baserade på likström skulle kräva en stor insats av forskning och innovationer både vad gäller utrustning men även hur denna ska styras och övervakas. Kablar för markförläggning är en central komponent där en miljon volt är en nivå som skulle möjliggöra transnationella och på sikt interkontinentala elnät. Gränsen för den maximala driftspänningen för likströmskablar visas i Figur 3. Den streckade linjen visar en extrapolering av dagens utvecklingstakt. Med den takten skulle en miljon volt nås någon gång mellan åren 2040 och 2050. Med tanke på målen om mycket små utsläpp av klimatgaser år 2050 är frågan om en accelererad utvecklingstakt av särskilt intresse.



VILKEN KOMMANDE TEKNIKUTVECKLING KAN VI FÖRVÄNTA OSS?

Utvecklingen av den nya tekniken förväntas ske alltmer globalt. Sverige har goda förutsättningar till utveckling av nya tillämpningar från programvaror till kompletta system. I Sverige finns framstående kompetens såväl inom elkraft- som informationsteknik.

VILKET BEHOV AV FORSKNING SER VI?

Om Sverige ska ha en ledande roll i utvecklingen av teknik för smarta elnät för elnäten krävs en kraftfull satsning på forskning, innovationer och kommersialisering. Flera andra länder satsar på teknik för smarta elnät för flexiblare elanvändning, exempelvis Sydkorea. Färre länder fokuserar på det som Sverige historiskt varit särskilt stark på, nämligen själva elnäten. Även dessa kan göras smartare. Från lokalnäten till befintliga och framtida transmissionsnät. För att åstadkomma den önskade utvecklingen föreslås en koordinerad satsning baserat på erfarenheter från pågående och planerade initiativ.

Skapa ett samlat program för utveckling av teknik för smarta elnät för tillämpning i befintliga elnät.

Forskning för de **befintliga elnäten** bör ta utgångspunkt i tillämpningar med kraftsystemanalys som grund för den nya tekniken. Det kan exempelvis handla om och hur stamnätet ska kunna användas närmare sina gränser för energiöverföringen genom att använda mätdata insamlade över ett stort geografiskt område. För detta krävs kunskap om hur kraftsystemet fungerar. Det kan även handla om hur elavbrott ska förebyggas och göras kortvarigare exempelvis genom avancerad analys av elektriska signaler i distributionsnät. Viktigt är att förankra forskningen i verkliga utmaningar där ett aktivt samarbete mellan leverantörer av elkraft- och informationstekniska varor och tjänster, elnätsföretag och tekniska högskolor är central för tillämpningen av resultaten.

Skapa en nationell samverkansplattform för utveckling av teknik för framtidens transnationella och interkontinentala transmissionsnät.

Utveckling av teknik för **framtida transmissionsnät** baserade på likströmsteknik skulle kräva stora satsningar på forskning. Här har Sverige särskilda möjligheter till export. Därför föreslås en nationell satsning för att möjliggöra kabelbaserade elnät med likströmsteknik.

Exempel – Teknik för smarta elnät för själva elnäten

April 2014



Avgränsning

- Exempelen hämtas från själva elnäten; det vill säga tillämpningar av tekniker för smarta elnät för nytta i elnäten.
- Balansering av volatil elproduktion med annan elproduktion och flexibel elanvändning omfattas inte av exemplen.

Mål

Teknikmognadsnivå – TMN

TMN 9: Kommersialisering

TMN 7-8: Produktutveckling

TMN 5-6: Teknisk verifiering, demonstration

TMN 3-4: Tillämpad grundforskning

TMN 1-2: Grundforskning

Resultat

R 4: Integrering av el från flödande energikällor över mycket stora avstånd

R 3: Färre och kortare elavbrott

R 2: Överföring på elnät närmare verkliga gränser

R 1: Tillräcklig elkvalitet trots mycket vindkraft och solex

Tre steg

- **M**äta
- **A**nalysera
- **S**tyra



Så till exemplen

R 1: Tillräcklig elkvalitet trots mycket vindkraft och soled



Solel i distributionsnät: Genom att mäta spänningen och styra omriktarna kan spänningen hållas inom gränser → mer solel utan att bygga ut elnätet



- Solceller ger likström
- Elnätet har växelspänning
- En omvandlare kopplas in mellan solcellerna och elnätet
- Vxelspänningen från en sådan omvandlare kan styras på likartat sätt som hos en vanlig generator
- Genom att mäta spänningar på flera platser i elnätet kan datorer räkna ut vilka växelspänningar som omvandlarna ska lämna
- Alla omvandlare anslutna till elnätet styrs för att få en spänning så nära 230 volt som möjligt överallt och låga energiförluster i elnätet

M

A

S

Braås: Mer vindkraft kan tillåtas genom att hela tiden mäta spänningar med elektroniska elmätare

TMN 5, R 1

- Spänningen hos elkunderna måste hållas inom vissa gränser för att utrustningar ska fungera; inte för långt från 230 volt
- Matar vindkraftverk in mycket el i ett elnät så stiger spänningen
- Genom att hela tiden registrera spänningar med många elmätare kan mer vindkraft tillåtas utan att spänningen blir för hög hos någon kund
- Spänningsmätningarna analyseras.
- Transformatorerna styrs så att de hjälper till att hålla spänningen i nätet inom gränserna

M

A

S



R 2: Överföring på elnät närmare verkliga gränser



Kårehamn: Genom att mäta temperaturen på linor i en kraftledning kan mer vindkraft byggas utan fler ledningar

TMN 7, R 2

- 16 vindkraftverk om totalt 48 megawatt har byggts under 2013
- Ledningsnätet klarar bara 30 megawatt när kylningen av linorna är som sämst (sol, lite vind och varmt ute)
- Med högre ström skulle kraftledningarnas linor blir för varma och därmed för långa – de hänger då ner för mycket vilket är farligt
- Men är det kallt och blåsigt kyls linorna bättre
- Lösning: Lintemperaturen registreras hela tiden med givare
- Datorer beräknar maximalt tillåten ström hela tiden
- Blir ledningen för varm så minskas vindkraftsproduktionen automatiskt.

M

A

S

Källa: http://www.nyteknik.se/nyheter/energi_miljo/vindkraft/article3651014.ece
<https://www.eon.se/om-eon/Om-energi/Energikallor/Vindkraft/Nordiskavindkraftsprojekt/>



Mer vindkraft kan tillåtas på Gotland genom att el som inte ryms i kabeln till fastlandet används i värmepumpar och varmvattenberedare

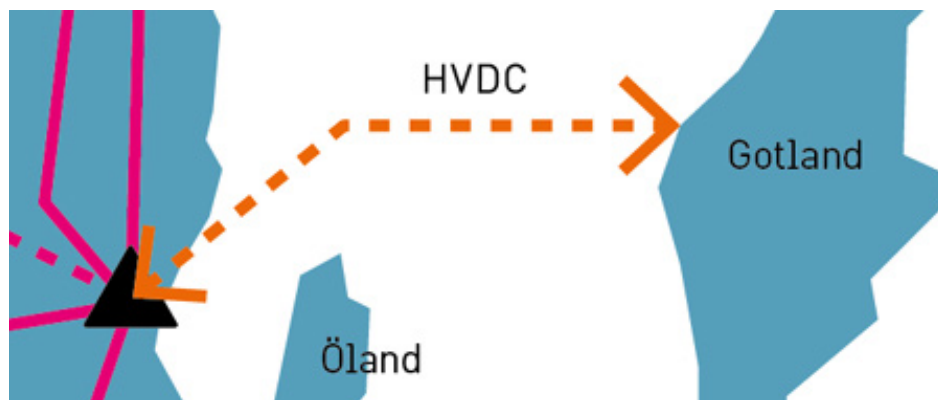
TMN 6, R 2

- Kabeln mellan Gotland och fastlandet är för liten för att överföra el från all vindkraft på Gotland.
- En ny kraftigare kabel ska byggas.
- I väntan på den nya kabeln kan mer vindkraft byggas ut genom att varmvattenberedare och värmepumpar på Gotland går igång när det blåser mycket och mycket vindkraftsel produceras på ön.
- Strömmen i kabeln mäts automatiskt och när den blir för hög skickas signaler som ökar eluttaget i varmvattenberedare och värmepumpar hemma hos folk.

M

A

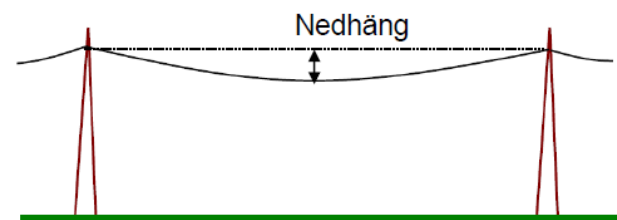
S



Naum: Väderobservationer ger möjlighet till mer ström i kraftledningarna

TMN 5, R 2

- Elnätet är för svagt för att ta emot all el från vindkraften
- Ledningarna är dimensionerade för en högsta ström givet mycket sol, lite vind och hög utomhustemperatur
- Blir linorna för varma hänger de ner för mycket mot marken vilket är farligt
- Vid hög vindkraftproduktion bör det även vara bättre kylning på ledningen
- Med *lokala väderstationer* uppe i vindkraftverken mäts vindhastighet och vindriktning **M**
- Med *meteorologiska modeller* förutsägs kylningen av kraftledningarnas linor **A**
- Ledartemperaturen beräknas hela tiden och blir den för hög någonstans på någon ledning så minskas automatiskt vindkraftproduktionen **S**



Marknadsgatan Falköping: Ett energilager ansluts till det lokala elnätet och minskar energiförlusterna i elnäten

TMN 6, R 2

- Energilagret har lagringskapaciteten 75 kWh
- Det är anslutet till lågspänningssidan av en transformator på Marknadsgatan i Falköping
- Energilagret laddas upp och ur tidsstyrt **(S)** **(M)**
- I framtiden kan upp- och urladdning ske baserat på mätning och analys av belastning i matande elnät **(A)**
- Energiförlusterna i elnätet minskar



Källa: Lars Ohlson, Falbygden Energi AB

Överföringskapacitet i stamnät: Genom att uppskatta aktuell risk för instabilitet → mer effekt kan överföras på befintliga nät

TMN 6, R 2

- Händelser i elsystemet kan orsaka stabilitetsproblem
- Risken är aldrig noll, men för att hålla den låg håller man marginaler i överföringarna
- Dessa marginaler är ofta konservativa och konstanta, vilket innebär att de inte är anpassade till den aktuella situationen
- Med nya metoder kan man ha en kontinuerlig anpassning av marginalerna till aktuell driftsituation vid given risk
- Man mäter aktuell elproduktion i olika punkter, elförbrukning, uppskattade prognosfel etc.
- Risk vid tänkbara händelser, problem, beräknas
- Därefter genomförs de åtgärder som behövs vid rätt tid i rätt punkt i elnätet för att hålla risken acceptabel

M

A

S

Högspänd likström och överföringskapacitet – 1: Genom att göra olika typer av små snabba ändringar i effektöverföringen kan parametrar i elsystemet uppskattas

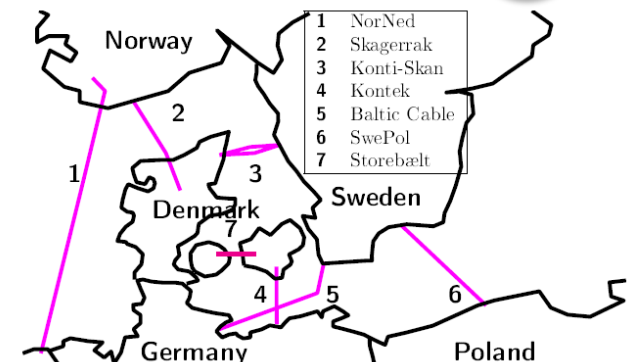
TMN 4, R 2

- I elsystem kan effektpendlingar uppstå vilket kan sätta en gräns för hur mycket effekt som kan överföras
- Hur och var pendlingar uppstår beror på systemets tillstånd
- För att veta hur man kan motverka pendlingar måste man ha full kunskap om systemets tillstånd
- Ett sätt att göra detta är att skapa en liten elektrisk störning i effektöverföringen på en ledning med högspänd likström
- Därefter mäts hur elsystemet reagerar, vilka pendlingar som uppstår, etc.
- Utgående från kunskap om hur reaktionen blev vid en given styrning kan man uppskatta systemets tillstånd

A

S

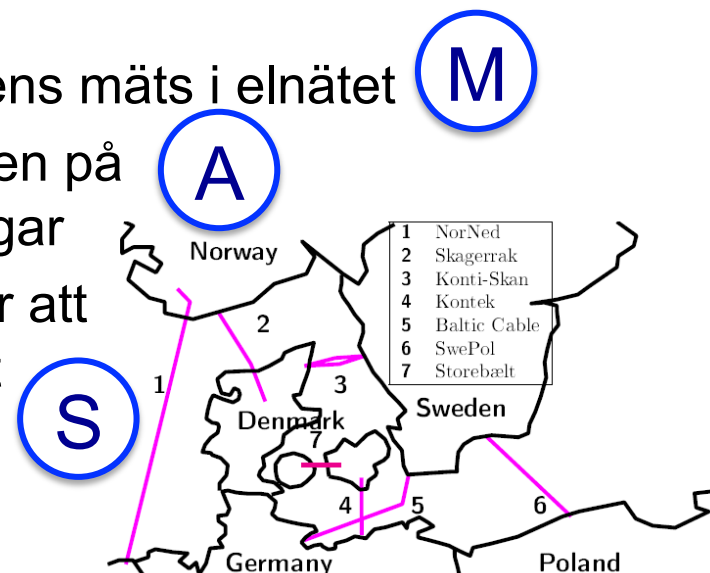
M



Högspänd likström och överföringskapacitet – 2: Genom att styra en länk med högspänd likström kan stabiliteten i elsystemet ökas vilket ökar effektöverföringsförmågan i stamnätet

TMN 4, R 2

- I elsystem kan effektpendlingar uppstå vilket kan sätta en gräns för hur mycket effekt som kan överföras
- I en länk för högspänd likström kan effektöverföringen styras kontinuerligt
- Genom att "motpendla" effekten genom en likströmlänk kan effektpendlingar i stamnätet dämpas.
- Effektpendlingars amplitud och frekvens mäts i elnätet **(M)**
- Man analyserar sedan hur överföringen på en HVDC kan minska dessa pendlingar
- Man styr därefter denna överföring för att uppnå så små pendlingar som möjligt



Källor: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?searchId=6&pid=diva2:401164>

Dämpning av effektpendlingar i elsystem: Genom att kontinuerligt mäta spänningar och strömmar i stamnätet och styra utrustning kan stabiliteten ökas

TMN 6, R 2,3

- Den slumpmässiga variationen i elanvändningen i kombination med långa kraftledningar från Norrland, leder till effektvariationer med mellan en och tio svängning per sekund
- Om dessa svängningar inte dämpas kan generatorer skadas och elsystemet kan falla isär
- Med satellitbaserad utrustning mäts spänningar och strömmar på flera ställen i elnätet med hög upplösning
- Dessa data analyseras för att bestämma svängningar i effektflöden
- Dämpande styrsignaler beräknas och skickas till utrustning som dämpar svängningarna i elsystemet som därmed blir mer driftsäkert



M

A

S



norden

Nordic Energy Research

STRONG²grid

Smart Transmission Grids Operation and Control
KTH - NTNU - AALTO - DTU - UI



SmartTS Lab
Smart Transmission Systems Laboratory

Den roterande energin i vindkraftverken hjälper till när annan produktion faller bort

TMN 9, R 2

- Om ett stort kraftverk i det sammankopplade elektriska systemet oväntat kopplas bort faller nätfrekvensen.
- Nätfrekvensen mäts i vindkraftverket. **M**
- Vindkraftverk som är anslutna till elnätet via inbyggda elektriska omvandlare -omriktare- kan bidra till frekvensstabiliteten.
- Faller frekvensen så ser styrning av omriktaren till att energiflödet genom omriktaren automatiskt ökas. Därmed minskas varvtalet för vindkraftverken genom att energin överförs från roterande delar till elnätet via omriktaren. På så sätt hjälper vindkraftverket till att mata in mer effekt precis som andra **A** kraftverk gör. **S**
- Efter några sekunder släpps automatiskt mer vatten på i frekvensreglerande vattenkraftverk och frekvensen i elnätet stiger igen.



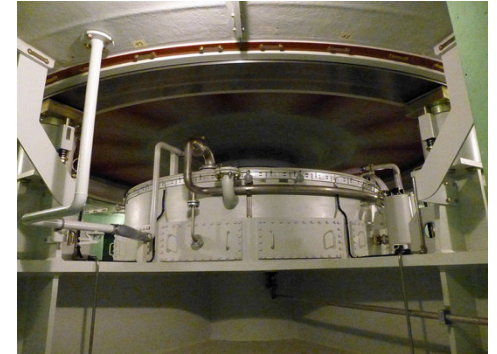
Vindkraft och överföringskapacitet: Genom att styra vindkraftverken kan man öka stabiliteten i elsystemet och därmed överföra mer el stamnätet



- I elsystem kan effektpendlingar uppstå vilket kan begränsa för hur mycket effekt som kan överföras TMN 4, R 2
- I vindkraftverk som har en omvandlare mellan generatoren och elnätet kan effekten genom omvandlaren styras.
- Pendlingar i elnätet kan motverkas genom att effekten genom omvandlarna styrs så att de pendlar i motsatt riktning. Detta medför att vindkraftens varvtal ändas något, men marginellt.
- Effektpendlingars amplitud och frekvens i elnätet mäts M
- Därefter analyseras hur vindkraftverk kan användas för att bäst minska dessa pendlingar A
- Styrbara vindkraftverk används för att dämpa pendlingar i stamnätet så bra som möjligt S

Stora generatorer och överföringskapacitet: Genom att styra kraftverkens generatorer kan stabiliteten i elsystemet ökas och därmed TMN 5, R 2 förmågan att överföra effekt

- I elsystem kan effektpendlingar uppstå vilket kan sätta en gräns för hur mycket effekt som kan överföras i stamnätet.
- Stora kraftverk har synkrongeneratorer. Deras spänning kan styras. Styrningen kan göras så att effektpendlingar i elsystemet dämpas.
- Utrustningen för pendlingsdämpning som styr generatorspänningen har inställningar som vanligen är fasta.
- Effektpendlingars amplitud och frekvens mäts i nätet. M
- Man analyserar sedan hur olika generatorer kan minska dessa pendlingar i den aktuella situationen. A
- Man ställer därefter in generatorstyrningarna för att uppnå så små effektpendlingar som möjligt i elsystemet. S

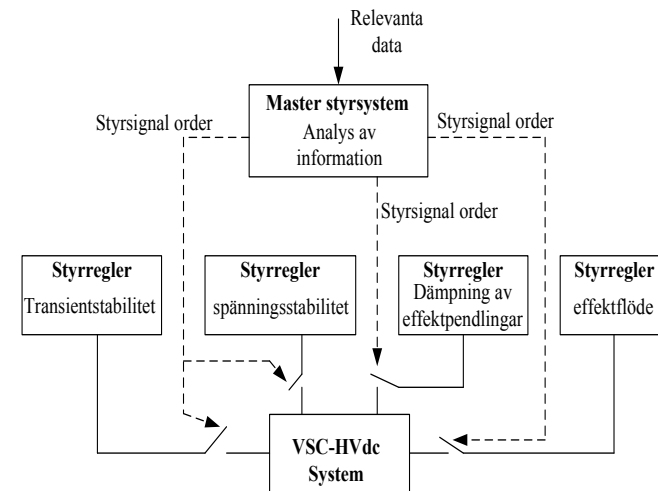


Källor: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?searchId=7&pid=diva2:558040>

Smart styrning av likströmssystem för högre förmåga att överföra effekt på stamnät med hög driftsäkerhet i elektriska energisystem

TMN 5, R 2,3

- Stabilitetsbegränsningar kan begränsa förmågan att överföra effekt i befintliga stamnät. Ett smart utnyttjande av spänningshållande egenskaper hos system för överföring av likström kan öka effektöverföringsförmågan driftsäkerheten i elsystemet.
- Elektriska mätdata, såväl lokala som systemvida, skickas till ett centralt datorsystem för analys
- Styr signaler skickas från datorsystemet till det spänningsstyva likströmssystemet
- Likströmssystemet styrs så att stabiliteten hålls hög i elsystemet



A

M

S

R 3: Färre och kortare elavbrott



Kanada: Färre elavbrott genom mätning, analys och användande av mobilapp

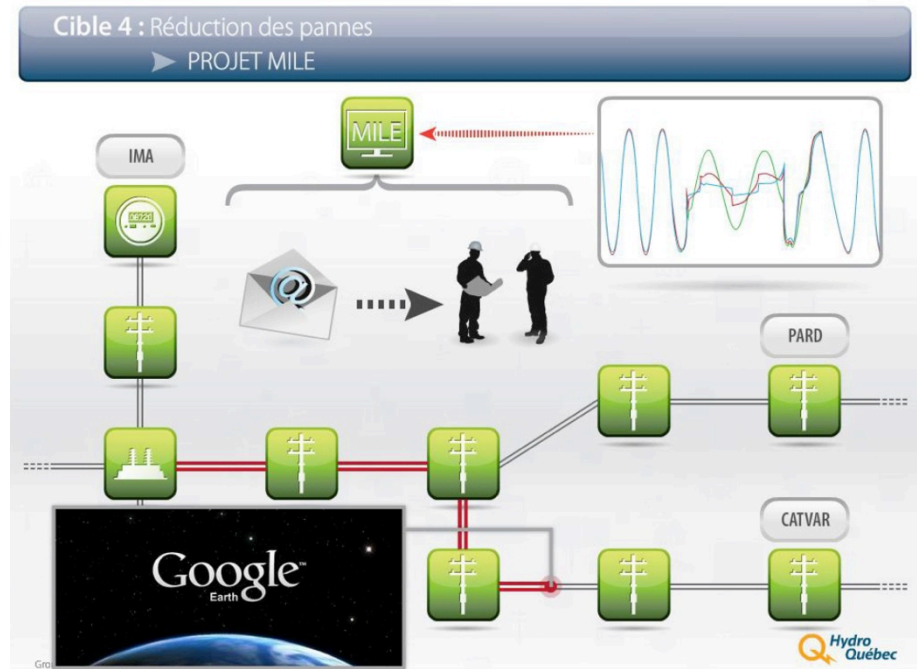
TMN 6, R 3

M

- En elektrisk störning i elnätet registreras automatiskt
- En programvara analyserar störningen och kommer fram till att en trädgren vajar mot en lina på en kraftledning
- Systemet sänder information om problemet i klartext till en mobilapp med GPS-koordinater som underhållspersonalen använder
- Trädgrenen tas bort och elavbrottet undviks

A

S



R 4: Integrering av el från flödande energikällor över mycket stora avstånd



Likströmsbrytare för stamnät med likström

- Likström är bättre än växelström för överföring av energi på stora avstånd och när kablar används. Men likström är svår att bryta.
- ABB har tagit fram en strömbrytare för likströmsnät TMN 9, R 4
- Brytaren fungerar så att
 - Strömmen genom brytarens kontakter mäts hela tiden
 - Uppstår en kortslutning blir strömmen hög
 - Då kopplas strömmens väg om så att den passerar transistorer
 - Med transistorer kan strömmen brytas
 - Strömmen går bara genom transistorerna när de ska bryta. Normalt flyter strömmen genom kontakter för i annat fall skulle energiförlusterna bli för stora
- På så sätt kopplas inte hela likströmsnätet bort utan bara en enda likströmsledning frånkopplas vid en kortslutning i ledningen

M
A
S



Supergrids

A high-power circuit breaker could finally make DC power grids practical.

At ABB's lab in Sweden, equipment such as corona shields — polished disks linked to form spheres — are used to test a high-voltage DC circuit breaker.



Syftet med ett elektriskt energisystem

Ett elektriskt energisystem, elsystem, består av kraftverk, generatorer samt de luftledningar, kablar och transformatorer som kopplar ihop alla kraftverken med de olika elanvändarna. Till detta kommer mät- informations- och skyddssystem som används för att hantera hela systemet på ett effektivt sätt.

Funktionen i elsystemet är att:

1. Se till att konsumenterna erhåller den efterfrågade effekten (t ex en 60 W-lampa), när de trycker på strömbrytaren. Detta ska fungera oavsett om det är haverier i kraftverk, blixten slår ner i en ledning, en utlandsförbindelse havererar, det blåser etc. Detta är detsamma som att kontinuerligt upprätthålla en balans mellan total produktion och total användning.
2. Se till att konsumenter får en rimlig spänning, t ex ca 230 V, i vägguttaget. Om spänningen avviker för mycket fungerar inte utrustningen som avsett. Motsvarande gäller för andra elanvändare som industrier.
3. Punkten 1-2 ska upprätthållas med rimlig tillförlitlighet. Denna är aldrig 100,0 procent, eftersom detta blir orimligt dyrt.
4. Punkt 1-3 ska upprätthållas på ett såväl ekonomiskt som hållbart sätt.

Om balans mellan produktion och användning

El kan i princip inte lagras. Detta innebär att så fort som el används så måste den produceras och även tvärtom, dvs. så fort som den produceras så måste den användas. Detta gäller alltid och är en fysikalisk 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 används den någonstans. El kan alltså inte "försvinna"! Det finns fysiskt sett vare sig "elöverskott", eller "elbrist". Det finns alltid en viss mängd förluster i ett elsystem, men dessa är normalt ett par procent (i Sverige ca 10 %) av användningen 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 användning inklusive förluster i elnäten. Ett exempel på en utmaning 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 eller ett par gånger per år i ett kärnkraftverk) så försvinner momentant en elproduktion om ungefär 1000 MW, vilket är elproduktionen i ett större kärnkraftverk. Det är ungefär lika mycket som Stockholms elförbrukning. 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

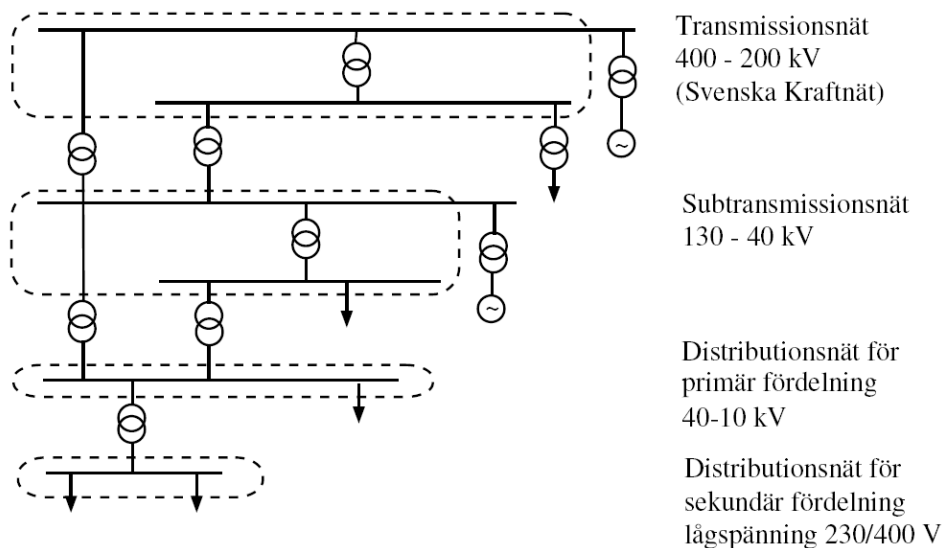
från någon annan energikälla! Detta hanteras i samtliga elsystem genom att man alltid måste ha reserver för bland annat detta.

Om spänningshållning i ett elsystem

Ett elkraftssystem består av produktionskällor som via kraftledningar och transformatorer överför elkraften till de slutliga konsumenterna. Elnätet mellan producenter och konsumenter delas in i olika delar enligt Figur .

Transmissionsnätet, som i Sverige kallas stamnätet, förbinder stora produktionsanläggningar och överför stora energimängder. Det svenska transmissionsnätet består av ca 15 250 km ledningar, och är på 23 ställen förbundet med utlandet. Den primära uppgiften för transmissionssystemet är att överföra energi från produktionscentra till områden med stor efterfrågan på el. Om man dessutom vill uppnå någon högre grad av effektivitet och tillförlitlighet måste även andra aspekter beaktas. Överföringssystemet gör det möjligt att optimera produktionen inom landet, dvs. använda de billigaste energikällorna så långt det är möjligt, samt även handla på ett effektivt sätt med utlandet. Dessutom är det nödvändigt att klara av ledningsbortkopplingar, blixtnedslag, bortfall av kraftverk samt oväntade variationer i elanvändningen utan att spänningens kvalitet blir för låg. Som framgår av *Figur* är transmissionsnätet maskat, dvs. det finns många parallella transmissionsvägar. Detta medför att om en ledning kopplas bort så finns det parallella vägar som elen kan transporteras på.

Det statliga affärsverket Svenska kraftnät ansvarar för samtliga 400 kV-ledningar och större delen av 220 kV-ledningarna i Sverige. Dessutom äger man och ansvarar för utlandsförbindelserna (dock ej Baltic Cable mellan Sverige och Tyskland), samt all transformering mellan 400 kV och 220 kV.



Figur 1 Elkraftsystemets struktur.

Subtransmissionsnät, i Sverige kallade *regionnät* har i varje belastningsregion helt eller delvis samma uppgifter som transmissionsnätet. Energimängder och överföringsavstånd är dock mer begränsade

än för transmissionsnäten, och tekniskt ekonomiska rimliga driftspänningar har därför lägre värden. De är anslutna till transmissionsnätet i normalt högst två nätpunkter.

Distributionsnät, även kallat *fördelningsnät* överför och fördelar den elkraft som tas ut från ett subtransmissionsnäts fördelningsstationer till slutförbrukare av elkraft. Distributionsnäten drivs normalt radiellt dvs det finns endast en specifik matningsväg till varje enskild konsument.

Olika slutförbrukares elkraftuttag varierar mycket liksom vid vilken spänningsnivå uttaget sker. Allmänt gäller att ju större en belastning är, desto högre är den spänning vid vilken den tas ut.

De nominella systemspänningarna (effektivvärde för trefas huvudspänning) som utnyttjas för distribution av *högspänd elkraft* är normalt lägre än de som utnyttjas för transmission. I figur 1 visas de spänningsnivåer som utnyttjas i Sverige. I speciella industrinät används, förutom de spänningar som visas i figur 1, även 660 V och den icke normerade spänningen 500 V. Distribution av *lågspänd elkraft* till förbrukarna sker i trefasledningar med neutralledare, varvid spänningen 400/230 V (huvudspänning/fasspänning) brukar användas.

Samtliga elnät i Sverige är anslutna till varandra. Slutkundens spänning beror på spänningsfall på kraftledningar och i transformatorer vilka i sin tur beror på nivån på produktion och användning i olika punkter i elsystemet. Eftersom samtliga elnät hänger ihop innebär detta att en elkunds spänning i en punkt mer eller mindre påverkas av produktion, användning och nätstatus i hela elnätet. Spänningsnivån kan dock regleras genom olika utrustningar, t ex i kraftverk, i transformatorer samt med speciella spänningsreglerande komponenter. Syftet är att kunder ska erhålla den nominella spänningen \pm ca 5 procent.

Om överföringskapacitet och stabilitet

Det finns olika typer av tekniska begränsningar för hur mycket eleffekt som kan överföras mellan två punkter i ett elsystem. Dessa begränsningar är:

- **Termisk begränsning:** Denna begränsning beror på att ökad effektöverföring leder till ökad ström vilket i sin tur leder till ökad uppvärmning av all komponenter som strömmen flyter genom. Termisk begränsning kan uppstå både i normal drift och då en störning inträffar i systemet. Båda fallen måste kunna hanteras och systemet är dimensionerat för att klara det. För till exempel luftledningar innebär ökad temperatur att ledningens linor blir längre och hänger ner mer. Det finns då en gräns för hur långt man kan tillåta ledningen att hänga ner ur säkerhetssynpunkt. Även för transformatorer och kablar finns gränser för hur mycket ström som kan tillåtas. Temperaturen på en luftledning påverkas av utetemperatur och vindstyrka och själva strömmens storlek beror på efterfrågad effekt samt vilken typ av elförbrukning det är. Olika typer av elförbrukningar ger olika storlek på strömmen vid samma effekt. Detta beror på fasvinkeln mellan spänning och ström.

Stabiliteten hos ett sammankopplat kraftsystem är dess förmåga att återgå till normal eller stabil drift efter att ha utsatts för en störning av något slag.

- **Spänningsinstabilitet:** Denna begränsning syftar på att man vid ett fel i systemet får ett spänningsfall. Det finns en gräns för hur låg spänning som kan accepteras i systemet och när skyddssystemen går in och börjar koppla bort utrustning. Denna gräns beror bland annat på

vilken utrustning, produktionsanläggningar eller andra spänningsstöttande komponenter, som finns att tillgå och deras möjlighet att hålla upp spänningen. Gränsen beror också på hur snabb spänningsregleringen är och vilka typer av styrsystem som finns där.

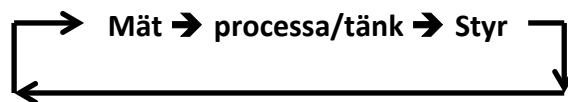
- **Vinkelinstabilitet-transient instabilitet:** Denna begränsning beror på att man vid till exempel blixtnedslag kan få en mycket kort (mindre än 1 sekund) bortkoppling av överföringen och då gäller det att det går att koppla in överföringen igen. Om man vid bortkopplingen av ledningen överför mycket effekt och inte lyckas koppla in överföringen tillräckligt snabbt (< 1 s) så riskerar generatorerna att accelerera så snabbt att ett instabilt läge uppstår och de tappar kopplingen till nätet. Ett elsystem måste vara berett på att dessa typer av störningar kan inträffa. Storleken på denna effektbegränsning beror på bland annat snabbheten i skyddssystemen som reagerar vid plötsliga fel mm.
- **Vinkelinstabilitet-pendlingar:** I ett kraftsystem förekommer hela tiden olika typer av små störningar som ger upphov till små pendlingar. Dessa uppstår p.g.a. av variationer i förbrukning och ändringar i hastighet hos produktionsanläggningarnas reglerutrustning, vilket innebär att olika kraftverk i olika ändrar av systemet pendlar mot varandra. Fenomenet uppstår p.g.a. att kraftverk är stora vikter som roterar och då kan dessa vikters rotationshastighet öka och minska, vilket leder till att elöverföringen också ökar och minskar. Detta är normalt inget problem i ett stabilt system, men om pendlingens amplitud ökar istället för att dämpas ut så kan det leda till oacceptabla spänningar och/eller strömmar vilket i sin tur leder till bortkoppling av olika komponenter.

Samtliga dessa begränsningar är mycket viktiga för hur elsystemet kan och måste drivas samt vilken tillförlitlighet man får vid en given överföring etc. Dessa dynamiska fenomen måste beaktas vid dimensioneringen och driften av elsystemet och sätter i många fall gränsen för hur mycket el som kan överföras i nätet.

För samtliga dessa begränsningar finns det en stor möjlighet att med hjälp av nya tekniska lösningar antingen öka gränsen i ett givet system med olika styrmöjligheter och/eller mer noggrant kunna uppskatta gränser genom bättre mät- och simuleringsmetoder och därmed kunna hålla mindre marginaler för osäkerheter.

Exempel på olika tekniska lösningar för att förbättra elsystemets prestanda

I ett kraftsystem pågår kontinuerligt processen



Mätning innebär att olika storheter, spänning och ström, mäts. → innebär någon form av informationsteknik som överför dessa mätsignaler. processa/tänk innebär att mätdata först måste presenteras på något lämpligt sätt, antingen som data till en dator (som kan **processa**) och/eller som ett interface för att en person ska kunna fatta ett beslut (**tänk**). Syften med såväl datorn som människan är att fatta ett relevant beslut om någon möjlig ändring i hur elsystemet körs. → innebär någon form av informationsteknik som kan överföra detta beslut till den komponent som berörs av beslutet. **Styr** innebär att den komponent som beslutet berör får i uppdrag att genomföra beslutet.

Det kan tilläggas att när ett beslut fattas om en viss åtgärd, så är det egentligen inte åtgärden som är den intressanta i sig utan konsekvensen av åtgärden. Antag, t ex, att man ser att spänningen sjunker i södra Sverige och man då skickar en signal för att ändra omsättningen i en transformator. Det är då inte "ändrad omsättning i transformatorn" (vilket är beslutet) som är det intressanta, utan att spänningen ändras på det sätt man tänkt sig. Det gäller därmed att man

- a) antingen har en mycket bra modell av systemet, dvs. man kan beräkna konsekvenserna av åtgärden, eller
- b) återkopplingen är så snabb så att man kan mäta konsekvensen (pilen tillbaka i figuren) av åtgärden

"Smarta elnät" innebär i praktiken åtgärder inom många av de olika områdena. En förutsättning för samtliga åtgärder är dock att det finns något att styra! Olika principiella möjligheter är:

- A. Mer mätplatser/sensorer, och högre frekvens av mätning. T ex elektriska mätsystem; så kallade PMU phase measurement units, system för automatisk avläsning av elmätare, eller temperaturmätare för ledningar/transformatorer.
- B. Snabbare kommunikation, vilket ökar möjligheten att få snabb återkoppling på åtgärder. Snabb återkoppling gör att man får en bättre bild av konsekvenser av olika åtgärder. Om man, t ex, ändrar en transformatoromsättning och direkt ser spänningsändring hos kund kan man identifiera hur elsystemet uppför sig.
- C. Bättre processteknik, t ex mycket snabba styrsystem som gör man mycket snabbt kan ställa om omriktare, brytare, kompenseringsutrustning (SVC) och på det sättet snabbt kan kompensera för olika fel och/eller motverka risk för instabilitet och/eller beräkna hur mycket en ledning kan belastas. Bättre process-teknik i form av bättre modeller gör också att man kan göra bättre prognoser på konsekvenser av en viss åtgärd.
- D. Mer styrbar utrustning, t ex styra spänningen i solkraftverkens omriktare, motverka pendlingar genom att styra vindkraftverkens produktion, få högspänd likström, HVDC, att leverera syntetisk tröghet etc.
- E. En intressant koppling mellan alla områdena är att man kan skapa bättre modeller av hela elsystemets funktion genom att med sensorer studera konsekvenser av olika åtgärder. Ett exempel är om prisändringar gör att kunder ändrar sin användning. Om många kunder reagerar samtidigt, vilket eventuellt kan mätas, så kan man identifiera hur detta påverkar flöden i elnät och ändringar i produktion. Detta kan då förbättra producenters och nätägares hantering av denna fråga och göra att de bättre kan driva sina anläggningar och göra rätt investeringar.