

SVENSKA KRAFTNÄT

Driftsäkerhet i kraftsystemet

– framtidens behov och förmågor

Augusti 2025



Innehåll

Introduktion

- Förord
- Om den här rapporten
- Översikt över analyser och rapporter
- Sammanfattande budskap

Ett kraftsystem i förändring

- Ökning av elbehov framöver men stor osäkerhet i utfallet
- Flera stora förändringar påverkar leveranssäkerheten
- Kraftsystemets dynamik förändras
- Kraftsystemet blir mer decentraliserat

Systembehov och förmågor

- Leveranssäkerhet
- Driftsäkerhet
- Systembehov och förmågor
- Robusthet
- Svenska kraftnäts verktygslåda

Beskrivning av systembehov

- Aktiv effektbalans
- Reaktiv effektbalans
- Synkronisering
- Dämpning
- Störningstålighet
- Återuppbyggnad
- Översikt över implementerade och framtida åtgärder

- Ordlista

○ Introduktion



Förord

För att möjliggöra omställningen till ett fossilfritt energisystem kommer elanvändningen att behöva öka kraftigt där prognoser och politiska mål pekar på en dubbling av den svenska elanvändningen till 2045. Kraftsystemet förändras också där elproduktion och elanvändning får andra egenskaper genom att de ansluts med kraftelektronik och mängden väderberoende elproduktion kontinuerligt ökar. Detta skapar nya utmaningar för driftsäkerheten samtidigt som kraftsystemet behöver förbli driftsäkert årets alla timmar, såväl i normalläge som under allvarlig påfrestning, i en framtid med ett allt mer elberoende samhälle.

Kraftsystemets ökade komplexitet innebär att Svenska kraftnät behöver jobba med en kombination av olika verktyg för att på ett effektivt sätt bibehålla driftsäkerheten. Samtliga verktyg kommer att behövas i allt större utsträckning. En ökad samverkan med branschen och alla dess aktörer är också en viktig pusselbit framöver för att åstadkomma de förändringar som behövs på mest effektiva sätt. Svenska kraftnät är ansvarig för att följa upp, det

av riksdagen fastställda, leveranssäkerhetsmålet för elsystemet och vidta eller föreslå nödvändiga åtgärder för att målet uppnås. Vi har även ett ansvar för planeringen av elsystemet, där driftsäkerhet ingår som en viktig parameter.

Denna rapport syftar till att beskriva kraftsystemets driftsäkerhet och vilka behov och förmågor som behövs i framtiden. Jag hoppas att den här rapporten ska ge en tydligare bild av Svenska kraftnäts arbete för att upprätthålla driftsäkerheten i kraftsystemet och vad som behöver göras för att skapa en driftsäker elförsörjning.

Viktoria Neimane

Avdelningschef Systemutveckling





Om den här rapporten

Välkommen till Svenska kraftnäts rapport om driftsäkerhet i det framtida kraftsystemet

Kraftsystemet genomgår en stor förändring när det gäller både produktion och användning av el. Syftet med den här rapporten är att skapa förståelse för hur förändringen påverkar driftsäkerheten och systemstabiliteten i kraftsystemet och hur Svenska kraftnät avser att agera för att hantera dessa förändringar. Ett driftsäkert och stabilt kraftsystem innebär ett system som klarar av att utsättas för störningar och så snabbt som möjligt kan återgå till ett normalläge.

Rapporten beskriver de framtida behov kraftsystemet har utifrån de förändringar som sker i systemet. För att hantera behoven och upprätthålla driftsäkerheten behöver olika förmågor finnas i systemet. Olika typer av elproduktion har alla olika förmågor att stödja systemet och dessa kan komma till nytta på olika sätt, till exempel genom kravställning eller genom stödtjänster. Svenska kraftnät vill i den här rapporten beskriva behoven, vilka lösningar och verktyg som finns och vad vi kommer att göra framöver för att säkerställa ett

driftsäkert och robust kraftsystem. Rapporten innehåller kvalitativa bedömningar av behov och förmågor.

Det räcker inte att kraftsystemet är driftsäkert för att möta samhällets behov, det måste också finnas tillräckligt med kapacitet i näten och tillräckligt med elproduktion. I den här rapporten har vi valt att fokusera på driftsäkerhet. Andra aspekter som också påverkar kraftsystemets leveranssäkerhet behandlas i andra rapporter, vilka översiktligt presenteras på nästa sida.

Rapporten vänder sig till läsare som är intresserade av kraftsystemet men inte är så djupt insatta i tekniken och som vill få en överblick av driftsäkerhet och systemstabilitet framöver. Syftet med rapporten är att på ett förenklat sätt beskriva komplicerad teknik vilket medför att rapporten inte håller en djupare teknisk nivå.



Översikt över analyser och rapporter

Rapporterna finns att hitta på svk.se respektive hos de europeiska transmissionsnätoperatörernas samarbetsorganisation, entsoe.eu

Långsiktiga scenarier

Svenska kraftnät:

- Långsiktig marknadsanalys 2024

ENTSO-E:

- Ten Year Network Development Plan 2024



Behovsanalyser

Svenska kraftnät:

- Driftsäkerhet i kraftsystemet 2025
- Kortsiktig marknadsanalys 2024
- Kraftbalansen på den svenska elmarknaden 2025
- Balancing market outlook 2030

Nordiskt:

- Nordic Grid Development Perspective 2025
- Requirement for minimum inertia in the Nordic power system 2023

ENTSO-E:

- European Resource Adequacy Assessment 2024
- Winter Outlook 2024–2025



Strategi och planer

Svenska kraftnät:

- Svenska kraftnäts strategi mot 2030
- Nätutvecklingsplan 2024–2033
- Systemutvecklingsplan 2022–2031
- Forsknings- och utvecklingsplan 2021–2024





SAMMANFATTANDE BUDSKAP

Drivande förändringar och behov av åtgärder

- Kraftsystemets komplexitet ökar då elproduktion och elanvändning i allt högre grad ansluts med kraftelektronik. Elproduktionen blir mer väderberoende men också mer distribuerad med mer produktion placerad längre ut i systemet.
- Osäkerheter i framtida elbehov samt produktionens tekniska egenskaper och beteende medför att Svenska kraftnät behöver planera och ta höjd för allt fler olika situationer och utfall. Varje utfall måste kunna hanteras med bibehållen driftsäkerhet.
- Svenska kraftnät kommer att behöva hantera ett system med stor andel väderberoende produktion framöver, såväl innan som efter att ny kärnkraft kan vara på plats.
- Med ett samhälle som blir allt mer elberoende ökar betydelsen av en välfungerande hantering av nöddrift och återuppbyggnad av kraftsystemet, särskilt vid samhällskriser och ytterst vid krig.



- Svenska kraftnät jobbar med en bred verktygslåda för att bibehålla tillräcklig driftsäkerhet i alla drifttillstånd. Bland verktygen finns investeringar i egna komponenter, ändamålsenlig kravställning på andra aktörers anläggningar samt marknadsbaserad anskaffning och ekonomiska incitament.
- Fler åtgärder krävs för att upprätthålla driftsäkerheten i alla drift- och samhällstillstånd framöver där valet av lämplig åtgärd utgår från ett samhällsekonomiskt perspektiv.
- Det är viktigt att samtliga aktörer och produktionsslag i kraftsystemet bidrar med förmågor och flexibilitet utifrån sina förutsättningar. Svenska kraftnät har, som systemansvarig för överföringssystemet, ansvaret att leda systemets aktörer genom utökat samarbete, incitament och kravställning.
- Synkron produktion bidrar med viktiga förmågor i kraftsystemet, idag och i framtiden. Även icke-synkrona anläggningar har möjlighet att bidra med liknande förmågor under förutsättning att rätt kravställning och incitament finns på plats.
- Innovation och teknikutveckling är viktigt för det framtida kraftsystemet och Svenska kraftnät behöver, tillsammans med övriga aktörer, fortsätta att utvärdera hur ny teknik med nya förmågor kan bidra till driftsäkerheten.

○ Ett kraftsystem i förändring



Ökning av elbehov framöver men stor osäkerhet i utfallet

De senaste 10 åren har kraftsystemet utvecklats och genomgått flera stora förändringar. Stora mängder vindkraft har byggts och andelen förnybar el i det svenska kraftsystemet har ökat. Under samma tidsperiod har flera kärnkraftsreaktorer ställts av. Sverige har idag en elproduktion som i princip är helt fossilfri och baserad på vind-, vatten- och kärnkraft, samt en ökande mängd el som kommer från småskalig solkraft.

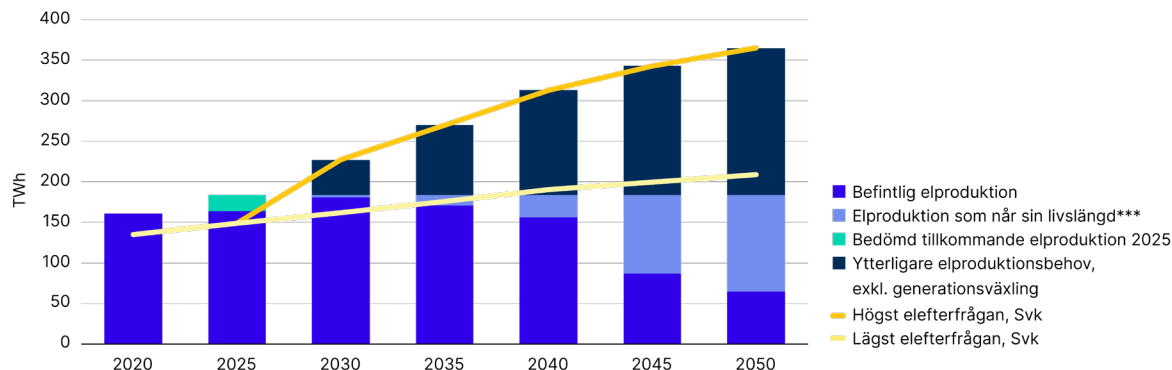
Sveriges elbehov bedöms öka på både kort och lång sikt. Ökningen beror framförallt av utvecklingen inom industrin med en ökad framställning av bland annat fossilfritt stål, elektrobränslen och grön vätgas. Stora osäkerheter finns i utfallet och utvecklingen presenteras som ett spann utifrån de senaste scenarierna framtagna av Svenska kraftnät.*

Det finns även osäkerheter kopplat till elproduktionen och dess egenskaper; vilken typ av produktion som etableras, när och var samt storlek på anläggningar är frågor som påverkar kraftsystemet. Antalet stora elanvändare kommer

förmodligen att öka framöver, något som också påverkar kraftsystemets beteende.

En stor mängd sol- och vindkraft kommer att tillkomma i kraftsystemet även om ny kärnkraft kommer till stånd i Sverige. Detta innebär att ett system med stor mängd variabel och omriktaransluten produktion** behöver hanteras såväl innan som efter att ny kärnkraft är på plats.

Osäkerheter i elbehov samt produktionens tekniska egenskaper och beteende skapar nya förutsättningar för Svenska kraftnäts planering. Vi behöver planera för att kunna hantera olika typer av utfall så att driftsäkerheten kan upprätthållas, trots att vi i dag inte vet säkert vilka förmågor som kommer att finnas tillgängliga i framtiden. Följden blir att åtgärder och marginaler måste utformas med en stor spridning i utfall i åtanke.



* [Långsiktig marknadsanalys](#), Svenska kraftnät, 2024

** Begreppen variabel och omriktaransluten produktion beskrivs närmare på följande sida

*** För kärnkraft har 60 års livslängd antagits

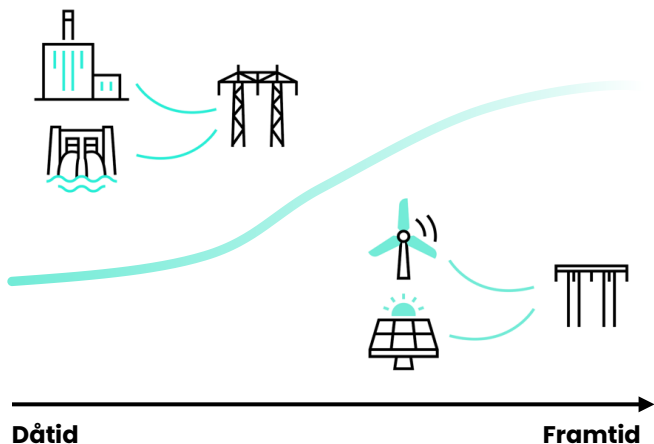


Flera stora förändringar påverkar leveranssäkerheten

Den förändrade produktionsmixen innebär att kraftsystemet har gått från i huvudsak planerbar produktion med synkront anslutna anläggningar till att också ha en stor andel variabel produktion med anläggningar som ansluter till elnätet via kraftelektronikbaserade omriktare. Produktion som ansluter via omriktare bidrar inte automatiskt med samma förmågor som den synkront anslutna produktionen typiskt har, som exempelvis rotationsenergi, vilket skapar nya utmaningar för kraftsystemets leverans- och driftsäkerhet. Omriktaransluten och variabel produktion har dock möjlighet att bidra med viktiga förmågor, om rätt krav ställs och om tillräckliga ekonomiska incitament för att göra bidraget lönsamt finns.

En stor del av den tillkommande produktionen ansluts på distributionsnätets nivå, till skillnad från tidigare då produktion oftast anslöts på transmissionsnätets nivå. Det innebär bland annat att det blir svårare för Svenska kraftnät att ställa direkta krav på exempelvis spänningsreglering och andra nödvändiga förmågor, då detta sker via

nätägarna på distributionsnätets nivå. Detta kan leda till att förmågorna måste anskaffas på andra sätt som är mindre effektiva. Användarsidan ändras också med fler nya stora förbrukningsanläggningar som ansluter till kraftsystemet så som exempelvis vätgasproduktion och serverhallar.



Med **planerbar produktion** avses elproduktion som under normala omständigheter kan styras till en på förhand känd nivå, till exempel kärnkraft, vattenkraft och termisk kraft. Den planerbara produktionen har tillgång till lagrad energi i form av vattenmagasin för vattenkraft eller bränslelager för termisk kraft. Vattenkraften är också ofta reglerbar, det vill säga att det är möjligt att relativt fritt bestämma när och hur mycket el den ska producera.

Med **variabel produktion**, även kallad icke-planerbar produktion, avses produktion som är svårare att styra till en särskild nivå då tillgänglig energi varierar med yttre faktorer som exempelvis väder. Den variabla produktionen utgörs primärt av vind- och solkraft. Variabel produktion kan i viss mån regleras, men huvudsakligen sker det enbart i nedåtriktningen.

Vind- och solkraft ingår i kategorin **icke-synkront ansluten produktion**, det vill säga elproduktion som använder generatorer som roterar oberoende av kraftsystemet alternativt inte roterar alls och där effekten matas in med hjälp av kraftelektronik. Denna typ av elproduktionsanläggningar kallas också **omriktaransluten produktion**. Detta till skillnad från vattenkraft och kärnkraft som är **synkront anslutna** till nätet, vilket innebär att generatorer fysikaliskt roterar i takt med kraftsystemet.



Kraftsystemets dynamik förändras

Kraftsystemet är beroende av att anslutna anläggningar kan bidra till styrning av kraftsystemets gemensamma storheter som frekvens och spänning samt aktiv och reaktiv effekt. Styrningen behöver fungera i olika tidsskalor, från bråkdelar av en sekund och uppåt.

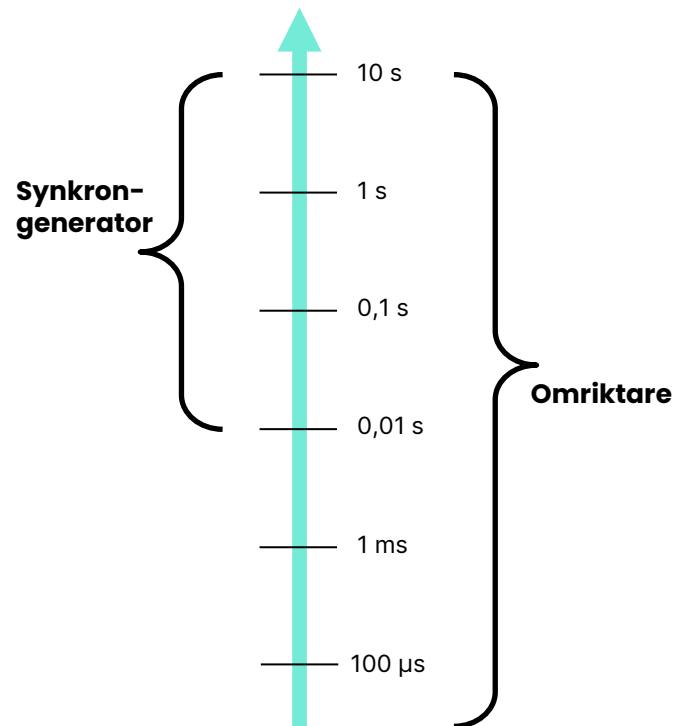
Roterande maskiner såsom synkrogeneratorer styr på ett effektivt sätt bland annat kraftsystemets spänning och frekvens. Synkrogeneratorerna har elektromekaniska egenskaper och dynamik som historiskt varit avgörande för kraftsystemets stabilitet och beteende.

Vind- och solkraft ansluts typiskt via kraftelektroniska omriktare. Omriktarens dynamiska egenskaper beror helt på dess styrning vilket ger stora möjligheter. Även den förbrukning som ansluts till kraftsystemet ändrar karakteristik med en mindre andel direktanslutna roterande maskiner och mer omriktaransluten förbrukning.

Med en allt större mängd omriktare förändras kraftsystemets dynamiska egenskaper där både problem och lösningar oftare uppträder på den snabbare delen av tidsskalan.

Omriktare

En omriktare är en enhet konstruerad med kraftelektronik. Enheten omvandlar likspänning (DC) till växelspanning (AC) eller vice versa, beroende på användningsområde. Den används ofta som gränssnitt för att ansluta vind- och solkraft till kraftsystemet.



* Fördjupning i ämnet återfinns i [Nordic Grid Development Perspective, 2023](#)



Kraftsystemet blir mer decentraliserat

Historiskt har kraftsystemet till stor del kontrollerats och hanterats av relativt få aktörer med tydlig ansvarsfördelning och goda möjligheter att koordinera åtgärder. Antalet aktörer som äger anläggningar och som deltar på olika marknader ökar nu. Vidare blir det vanligare att anläggningsägaren inte själv underhåller och sköter driften av sina anläggningar utan låter detta skötas av tredje part. Denna utveckling förväntas fortsätta och leder till ett ökat behov av koordinering mellan aktörer med olika funktioner i kraftsystemet.

När en växande andel av elproduktionen är ansluten till andra nätägare än Svenska kraftnät växer utmaningarna med att bibehålla en god driftsäkerhet. Resurser som är viktiga för driften av kraftsystemet,

genom att bidra med avgörande förmågor, är inte i samma utsträckning som tidigare reglerade av de krav som Svenska kraftnät ställer. Ansvar för att ställa krav faller i stället på region- och lokalnätägarna som måste ta hänsyn till ansvaret dels för sin egen driftsäkerhet, dels för att de förmågor som finns hos anslutande anläggningar görs tillgängliga för kraftsystemet i stort.

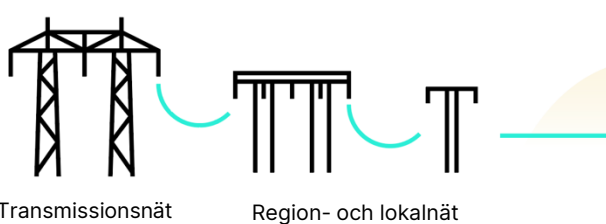
Därtill är vissa av dessa behov relativt lokala och behöver hanteras på en viss plats, exempelvis överlast på en ledning eller spänningsnivån i en station. Sådana behov behöver då hanteras av närliggande anläggningar. Andra behov, exempelvis aktiv effektbalans för lastföljning och balansering, kan hanteras relativt fritt i förhållande till placering i

kraftsystemet. Det kräver likväl en omfattande koordinering då allt fler mindre och distribuerade resurser behöver nyttjas. Detta medför ett ökande behov av att ha en tydlig ansvarsfördelning och koordinering mellan Svenska kraftnät och övriga aktörer för att säkerställa tillräckliga förmågor i kraftsystemet. Berörda aktörer behöver också ha tillräcklig bemanning och kompetens för att fullgöra sin roll i kraftsystemet.

Svenska kraftnät har som systemansvarig för överföringssystemet ansvar för att leda systemets aktörer genom utökat samarbete. Vår uppgift är att skapa incitament för aktörerna, genom bland annat kravställning och marknadsbaserade stödtjänster.

Alla systemets aktörer behöver kunna bidra till att upprätthålla kraftsystemets funktion. Berörda aktörer ska tillhandahålla nödvändiga förmågor, vid den tidpunkt och i den mängd som kraftsystemet behöver, utifrån regelverk och ingångna avtal.

Alla tillkommande teknikslag, exempelvis kärnkraft, vindkraft och vätgasproduktion, behöver kunna bidra med förmågor i förhållande till sin andel av elproduktionen och elanvändningen i kraftsystemet.



Systembehov och förmågor



Leveranssäkerhet

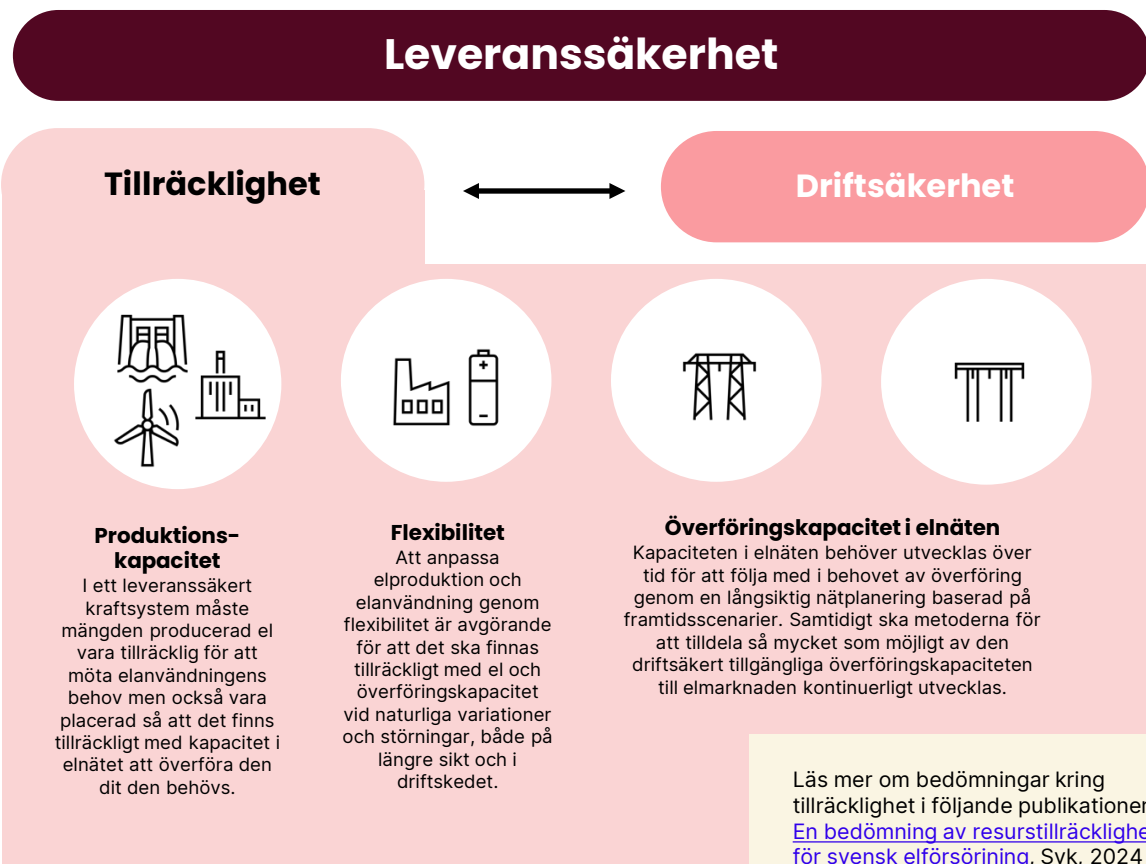
Med leveranssäkerhet avses kraftsystemets samlade förmåga att producera och överföra el så att elanvändarna kan använda den el de behöver, vid den tidpunkt och på den plats där de vill använda den, även vid ansträngda driftsituationer och vid vanligt förekommande störningar.

Leveranssäkerhet kan delas upp i tillräcklighet och driftsäkerhet:

- **Tillräcklighet** avser att en tillräcklig mängd el kan produceras och överföras så att den tillgängliga elen räcker till för att täcka elanvändarnas behov.
- **Driftsäkerhet** avser att kraftsystemet ska kunna fungera under normala förutsättningar samt kunna motstå påfrestningar i form av olika typer av störningar.

Tillräcklighet och driftsäkerhet är två mål som till viss del har en inneboende konflikt då ökad driftsäkerhet bland annat kan uppnås genom inskränkningar i tillräckligheten, exempelvis genom reducerad överföringskapacitet. Svenska kraftnät gör avvägningen mellan driftsäkerhet och tillräcklighet utifrån risk och samhällsekonomiska bedömningar.

Denna rapport fokuserar huvudsakligen på driftsäkerhet.



Läs mer om bedömningar kring tillräcklighet i följande publikationer:
[En bedömning av resurstillräckligheten för svensk elförsörjning](#), SvK, 2024
[European Resource Adequacy Assessment](#), ENTSO-E, 2024
[Långsiktig marknadsanalys](#), SvK, 2024



Driftsäkerhet

Pålitliga leveranser av el är avgörande för samhället oavsett samhällstillstånd, där en säker elförsörjning ska upprätthållas i fredstida normalläge såväl som i högsta beredskap och krig. Med begreppet **driftsäkerhet** avses behovet hos kraftsystemet att kunna fungera under normala förutsättningar samt kunna motstå påfrestningar i form av olika typer av störningar. Kraftsystemet ska kunna motstå såväl små kontinuerliga variationer i driftförutsättningar som större enskilda förändringar och bortkopplingar. Vissa störningar är så stora och osannolika att det inte är ekonomiskt försvarbart att utforma kraftsystemet för att kunna motstå dessa utan då kan följden bli omfattande elavbrott. Av den anledningen ingår även behovet av att kunna återuppbygga systemet efter ett nätsammanbrott i begreppet driftsäkerhet.

Hur stora störningar som kraftsystemet ska kunna motstå avgörs av de dimensioneringskriterier som används. Grunden i Svenska kraftnäts dimensioneringskriterier är det så kallade **N-1-kriteriet**, vilket innebär att kraftsystemet ska kunna motstå samtliga enskilda störningar som kan inträffa i systemet. Enskilda störningar motsvarar bortfall av exempelvis en ledning eller en

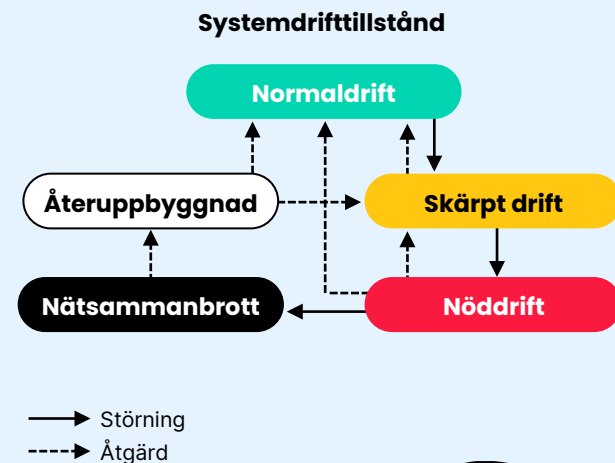
produktionsanläggning. Flera samtidiga fel med gemensam orsak kan omfattas i de fall där sannolikhet och konsekvens bedöms vara tillräckligt höga. Flera samtidiga men oberoende fel omfattas generellt inte av dimensioneringskriterierna.

N-1-kriteriet innebär att kraftsystemet har vissa marginaler för att klara störningar, vilket ger en grundläggande nivå av **robusthet** i kraftsystemet. Det är dock önskvärt att kraftsystemet kan motstå även större störningar än de som anges av N-1-kriteriet i den mån det finns åtgärder för detta som är kostnadseffektiva. Sådana åtgärder bidrar till ökad robusthet.

Behovet av driftsäkerhet i kraftsystemet kan delas in i olika **systembehov** som beskrivs vidare från sidan 24 och framåt. För att möta systembehoven nyttjas olika **förmågor** som bidrar med egenskaper till kraftsystemet. Förmågorna kan vara antingen inneboende egenskaper hos olika teknisklag eller tillförda genom kravställning och incitament. Dessa förmågor och hur de kan tillföras i tillräcklig mängd beskrivs närmare på nästkommande sidor.

Ramverk för driftsäkerhet

Dimensioneringskriterier, tillsammans med driftsäkerhetsgränser och systemdriftstillstånd, bildar en del av det ramverk Svenska kraftnät använder för att hantera driftsäkerhet i det nationella överföringssystemet. Förutsättningarna för att genomföra åtgärder skiljer sig åt mellan olika systemdriftstillstånd. I samtliga drifttillstånd finns det en teknisk kravställning som beskriver hur en anläggning ska bete sig. I normaldrift bidrar frivilliga åtgärder som marknader och stödtjänster till driftsäkerheten. I nöddrift och återuppbyggnad har Svenska kraftnät ett större mandat att ta till tvingande åtgärder för att upprätthålla driftsäkerheten.





Systembehov och förmågor

Förutsättningarna för att upprätthålla driftsäkerheten kan beskrivas utifrån tre olika faktorer: **inneboende** och **tillförda förmågor** samt **systembehov**. För att kraftsystemet ska vara driftsäkert måste bidraget från de inneboende och tillförda förmågorna överstiga systemets behov av de egenskaper och funktioner som behövs för att motstå en viss typ av påfrestning.

Inneboende förmågor



Tillförda förmågor



Systembehov

Med **inneboende förmågor** avses egenskaper som finns i kraftsystemet och dess anslutna anläggningar utan att systemet explicit designats för att ha dessa egenskaper. De inneboende förmågorna är alltså egenskaper som finns naturligt hos anslutna anläggningar och kan bidra till att förbättra eller försämma kraftsystemstabiliteten och driftsäkerheten.

Typiska exempel på sådana förmågor är den mekaniska rotationsenergin och felströmsinmatning hos synkrongeneratorer samt frekvens- och spänningsberoendet hos vissa förbrukningsanläggningar som momentant reagerar på avvikelser i frekvens respektive spänning.

Med **tillförda förmågor** avses egenskaper och funktioner som Svenska kraftnät och andra aktörer har tillfört kraftsystemet och som annars inte hade funnits, åtminstone inte i samma utsträckning. Svenska kraftnät kan tillföra förmågor genom investeringar i egen utrustning och nät, kravställning samt ekonomiska incitament och anskaffning.

Vissa tillförda förmågor är identiska med eller efterliknar de inneboende förmågorna, exempelvis syntetisk rotationsenergi, syntetisk frekvensberoende last, synkronkompensatorer och synkronkompensatordrift av generatorer. Andra förmågor är alltid tillförda, till exempel frekvens- och spänningsreglering.

Ett driftsäkert kraftsystem ska kunna fungera under normala förutsättningar samt kunna motstå påfrestningar i form av olika typer av störningar. Detta medför flera olika **systembehov** för att kunna motstå exempelvis variationer i aktiv och reaktiv effekt samt andra händelser som ligger utanför Svenska kraftnäts direkta kontroll. Det kan exempelvis handla om naturliga effektvariationer mellan produktion och förbrukning såväl som stora störningar i en eller flera enskilda anläggningar. Störningarnas och de naturliga variationernas beteende i form av storlek, varaktighet och snabbhet bidrar till att skapa behovet av åtgärder och förmågor.

Störningar och variationer kan påverkas genom bland annat kravställning och ekonomiska incitament, exempelvis ramphastighetsbegränsningar, begränsning av största enskilda felfall och obalansavgifter.

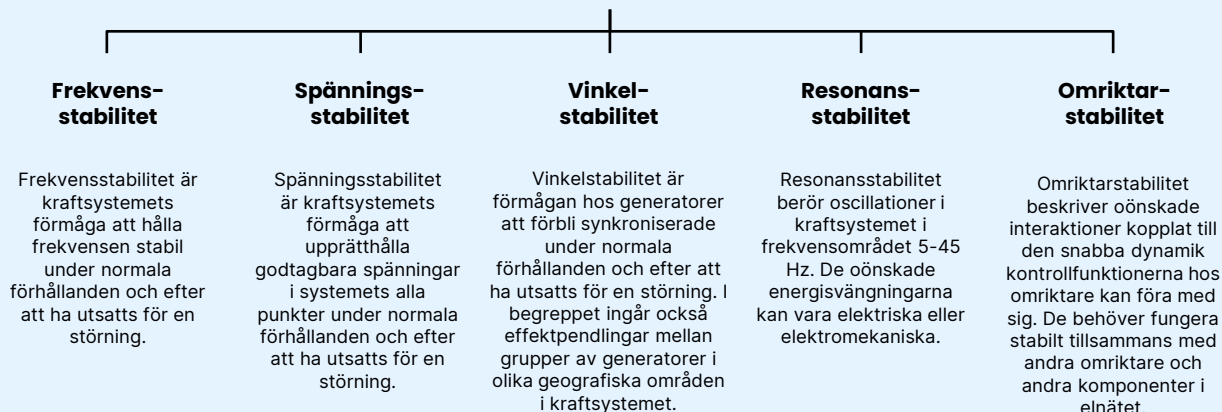


Kraftsystem- stabilitet

Om kraftsystemets behov av en viss egenskap inte tillgodoses kan systemet bli instabilt. Med begreppet stabilitet avses förmågan hos ett kraftsystem att upprätthålla ett jämviktsläge samt förmågan att återgå till ett acceptabelt jämviktsläge efter att ha utsatts för en störning, till exempel att frekvensen hålls inom givna gränser under och efter störningen.

Kraftsystemstabilitet kan delas in i fem kategorier*. Av dessa är det frekvens och spänning som motsvarar väldefinierade fysikaliska storheter med definierade målvärden. Målvärdet för frekvensen är 50 Hz medan spänningens målvärde varierar med spänningsnivån i respektive punkt i nätet. De övriga tre stabilitetskategorier – vinkelstabilitet, resonansstabilitet och omriktarstabilitet – utgör ytterligare villkor som måste vara uppfyllda för att systemet ska vara synkroniserat och väldämpat. De två sistnämnda kategorierna har blivit allt mer relevanta på senare år, i takt med att andelen omriktaransluten produktion ökat.

Kraftsystemstabilitet



* Indelningen baseras på: Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended, IEEE, 2021



Robusthet

Robusthet är ett mått på hur stora påfrestningar kraftsystemet klarar av att motstå. Ett system med hög robusthet klarar stora avvikelser från planerade drift-förutsättningar. Utan robusthet kan avvikande driftförutsättningar leda till exempelvis inskränkningar i överföringskapacitet i syfte att upprätthålla driftsäkerheten. Robusthet är därför en nödvändighet för att upprätthålla leveranssäkerheten.

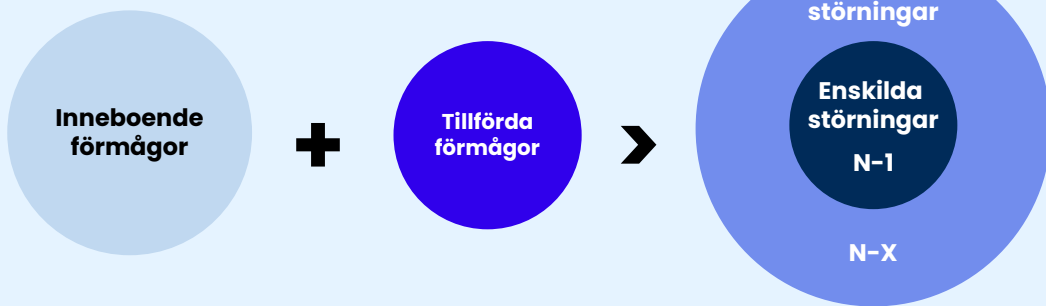
Hur robust kraftsystemet ska vara avgörs av Svenska kraftnäts dimensioneringskriterier. Kriterierna innebär en avvägning eftersom en allt för stor robusthet kan tyda på att kraftsystemet överdimensionerats eller inte utnyttjas effektivt nog, vilket medför ökade kostnader.

Grunden i Svenska kraftnäts dimensioneringsregler är att kraftsystemet ska kunna motstå samtliga enskilda fel som kan inträffa (N-1-kriteriet). Flera samtidiga fel med gemensam orsak kan omfattas i vissa fall, där sannolikhet och konsekvens bedöms vara tillräckligt höga. Detta bidrar till en utökad nivå av robusthet. Flera samtidiga men oberoende fel (**N-X**) omfattas dock generellt inte av dimensioneringskriteriet. Historiskt har dock kraftsystemet i många fall ändå varit så robust att det har kunnat motstå mycket större störningar än det har dimensionerats för. Ett exempel på detta är störningen den 23 april 2023 som presenteras på nästa sida.

Grundläggande robusthet



Utökad robusthet





EXEMPEL

Störningen 26 April 2023

Störningen i station Hagby våren 2023 bestod av flera oberoende och på varandra följande fel som ledde till en extrem påfrestning på kraftsystemet.* Felbortkoppling och medföljande låga spänningar påverkar normalt systemet kortare tid än 0,2 s. Här var spänningen väldigt låg under 7 s, och anslutna anläggningars dynamik och störningstålighet fick därför stor betydelse. På grund av den låga spänningen kopplades två stycken kärnkraftsblock bort från nätet för att skydda anläggningarna, med följd att den produktion av effekt som förlorades (mer än 2000 MW) vida översteg det dimensionerande felet (1400 MW). Trots att störningarna i spänning och aktiv effekt översteg den storlek som kraftsystemet är designat att tåla så var påverkan på kraftsystemet i stort relativt liten.

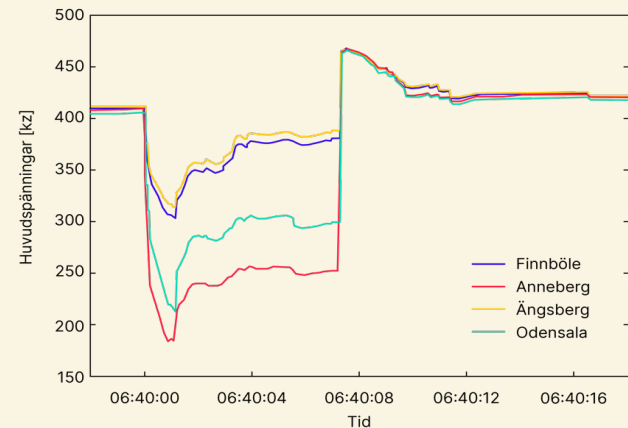
Händelsen är ett exempel på hur spänning- och frekvensstabilitet relaterar till störningstålighet och hur flera stabilitetsfenomen kan inträffa samtidigt. Störningen påverkade frekvensen avsevärt via obalans i aktiv effekt men utfallet mildrades av

spänningsberoendet hos ansluten förbrukning som påverkades av spänningsstörningen. I en situation med mindre marginaler och sämre robusthet hade störningen, som var långt större än dimensionerande fel, fått långt mer omfattande påverkan.

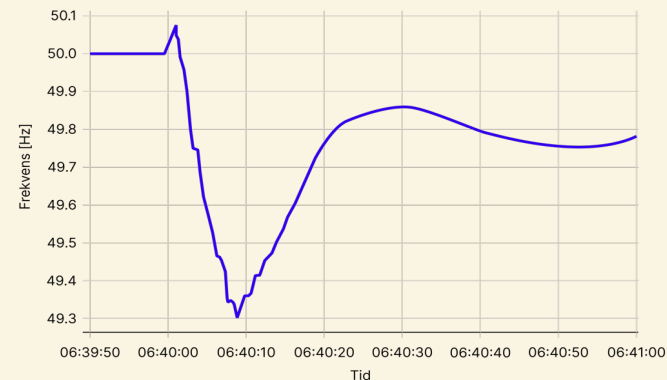
Robustheten som uppvisades vid störningen kommer sig till stor del av den stora mängden inneboende förmågor, exempelvis mekanisk rotationsenergi, som fanns i kraftsystemet vid tillfället. Händelsen är därför också ett exempel på hur stora mängder av inneboende förmågor i många situationer inneburit att kraftsystemet historiskt har varit så robust att det kunnat hantera störningar som är mycket större än N-1-kriteriet.

I ett framtida kraftsystem, med en stor mängd tillförda förmågor som måste dimensioneras utifrån specifika kriterier, så hamnar robustheten på den nivå som kraftsystemet designas för. Det blir då kritiskt att välja vilka störningar som ska kunna hanteras, och hur robust kraftsystemet ska vara.

Spänningar i närliggande stationer under störningen



Störningens påverkan på frekvensen



* Händelseförloppet under störningen beskrivs mer ingående i rapporten [Driftstörningen den 26 april 2023](#), SvK, 2023.

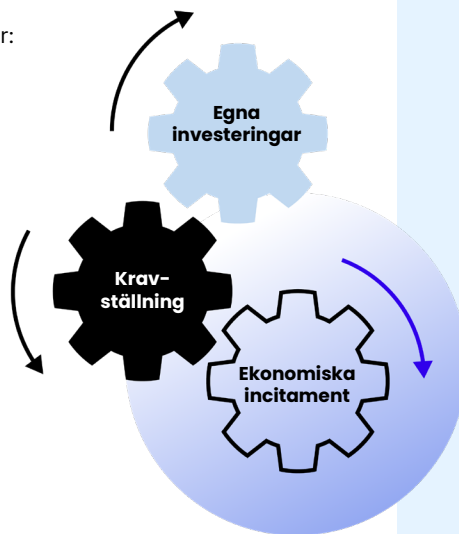


Svenska kraftnäts verktygslåda

Svenska kraftnät har ett antal verktyg i sin verktygslåda för att möta kraftsystemets behov. Syftet med verktygen är att tillföra förmågor och begränsa storleken på störningar i kraftsystemet.

Verktygslådan består av tre delar:

1. Investeringar i egen utrustning och nät
2. Kravställning
3. Ekonomiska incitament och anskaffning av förmågor



När Svenska kraftnät identifierar ett behov av att tillföra en förmåga i kraftsystemet så är ett alternativ att tillföra förmågan i egen regi genom investeringar i egen utrustning. Svenska kraftnät kan också välja att tillföra åtgärder i samverkan med andra aktörer, i form av kravställning respektive ekonomiska incitament.

Investering i egen utrustning och nät

Egna investeringar kan exempelvis ske genom att installera utrustning för spänningsreglering i våra egna stationer.

Kravställning

Kravställning kan bland annat ske genom att ställa tekniska krav för anslutning och drift av anläggningar i kraftsystemet, och genom marknadskrav som exempelvis funktionella krav vid marknadsdeltagande och obalanshantering.

Ekonomiska incitament och anskaffning

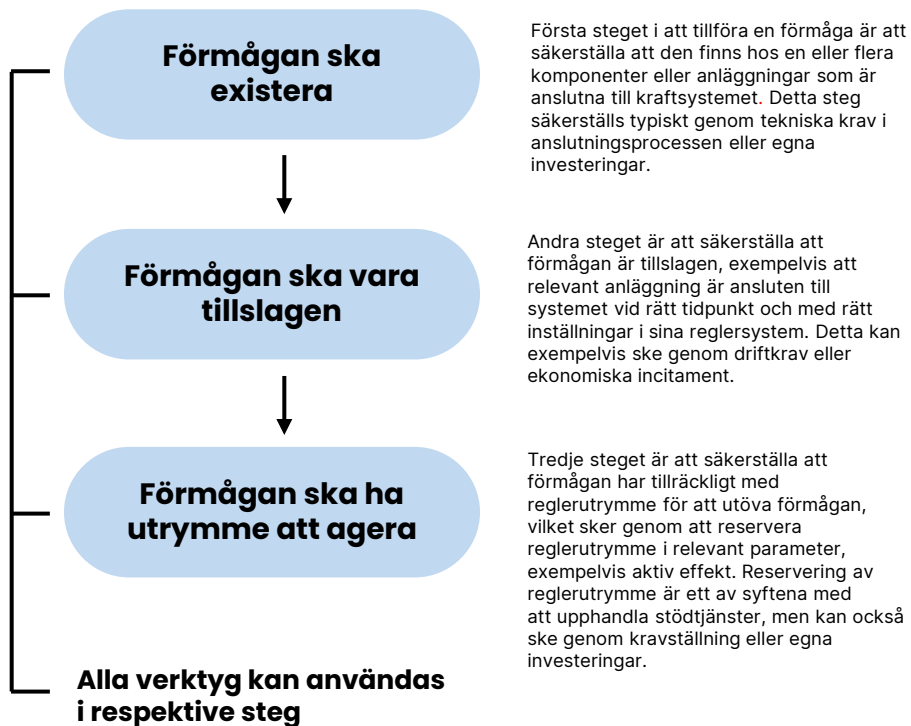
Upphandling och ersättning av stödtjänster är ett exempel på ett ekonomiskt incitament för berörda anläggningsägare.

Det är vanligt att flera av verktygen behöver användas när en åtgärd ska införas. Exempelvis så utgör upphandling av stödtjänster ett ekonomiskt incitament för berörda anläggningsägare, samtidigt som stödtjänsterna omfattas av en omfattande teknisk kravställning för att säkerställa deras effektivitet.

Det är också vanligt att Svenska kraftnät vidtar flera åtgärder baserat på olika verktyg men med liknande syfte. Exempelvis så installerar Svenska kraftnät egen spänningsreglerande utrustning samtidigt som det finns anslutningskrav på produktionsanläggningar att kunna bidra med liknande förmågor.



Att tillföra en förmåga



EXEMPEL

Nätformande omriktare

Nätformande omriktare (Eng: "Grid forming") kan beskrivas som en ny generation av styrning där omriktare kan bidra med grundläggande förmågor till elnätet. Styrningen kan utformas för att efterlikna fysiska egenskaper hos synkrogeneratorer och för att utnyttja omriktarnas potential att möta systembehov. Samtliga stabilitets-kategorier påverkas av förändringen och flertalet är beroende av att omriktare blir nätformande för att en högre andel omriktaranslutna resurser ska vara möjlig.

Hur nätformande egenskaper definieras är avgörande för vilken roll omriktaranslutna anläggningar kan spela för driftsäkerheten i det framtida kraftsystemet. Definitionen kan appliceras på egna investeringar, blir central för kravställningen av andras anläggningar och lägger grunden för att via ekonomiska incitament säkerställa rätt förmågor för att möta systemets behov.

Att förmågan ska existera betyder i det här fallet att definitionen av egen-skaperna förankras mellan tillverkare och systemansvariga, antingen i direkt dialog eller via anslutningskoder och implementeringsguider. Att förmågan ska vara tillslagen och ha utrymme att agera betyder i det här fallet att Svenska kraftnät undersöker vilka verktyg som är lämpligast för att säkerställa att rätt nätformande egenskaper tillgängliggörs.

Syntetisk rotationsenergi: Med nya typer av styrning skulle den energi-buffert som finns i de roterande turbinerna hos vindkraften kunna tillgängliggöras som en tillförd förmåga i kraftsystemet och bidra med exempelvis dämpning och snabb frekvensreglering. Även förmågor hos andra resurser med en inneboende energibuffert, exempelvis batterier och vätgasproduktion med lager, skulle kunna tillgängliggöras på motsvarande sätt.

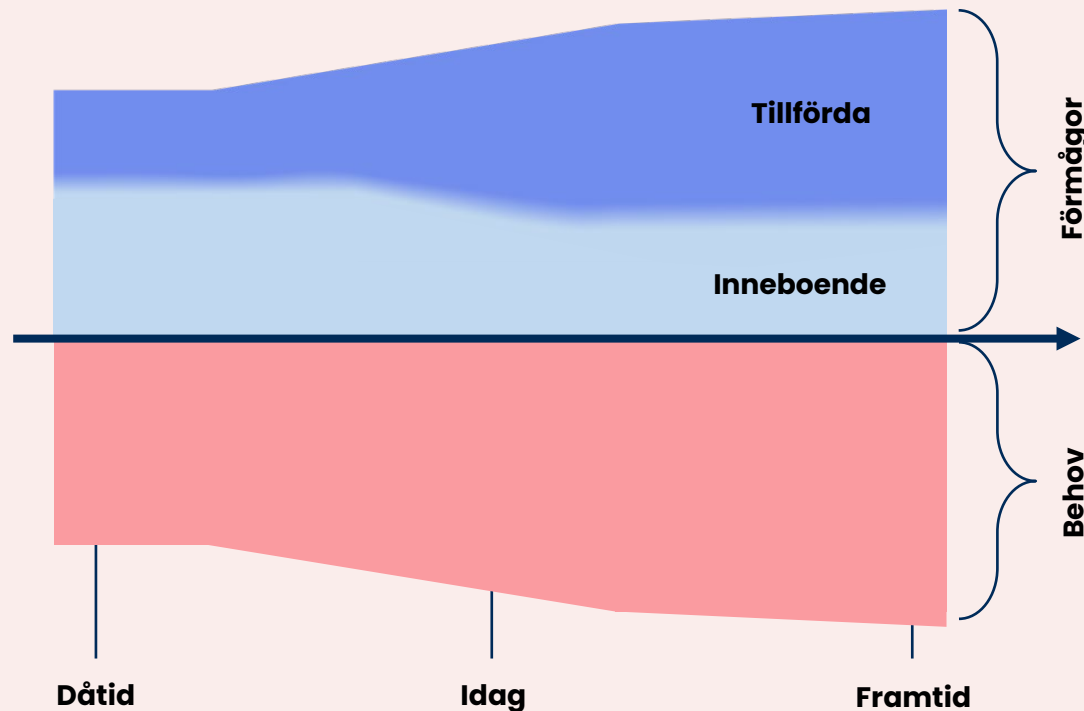


Driftsäkerhetens utveckling över tid

Behoven kommer att ändras över tid och med det också de förmågor som krävs för att bibehålla robusthet i det framtida kraftsystemet. Grafen illustrerar en utveckling där behovet av förmågor som säkerställer driftsäkerheten ökar över tid. När kraftsystemet går från en huvudsakligen storskalig, planerbar och synkron produktion mot en i högre grad decentraliserad, variabel och omriktaransluten produktion samtidigt som elanvändningen dubblas, påverkas driftsäkerheten på flera sätt.

När andelen synkront ansluten produktion med sina fysikaliskt inneboende förmågor blir lägre sker ett skifte i kraftsystemet där traditionella antaganden inte längre är giltiga. De inneboende förmågornas egenskaper och mängd förändras samtidigt som behoven ökar i storlek och förändras i sin natur. Tillförda förmågor kommer spela en större roll än tidigare, oavsett hur framtidens produktionsmix kommer att se ut.

Det är avgörande med uppdateringar av dagens stödtjänster, en mer omfattande kravställning för att tillföra förmågor och en betydande ökning av Svenska kraftnäts egna investeringar för att säkerställa de förmågor som krävs för att upprätthålla robusthet och driftsäkerhet.



○ Beskrivning av systembehov

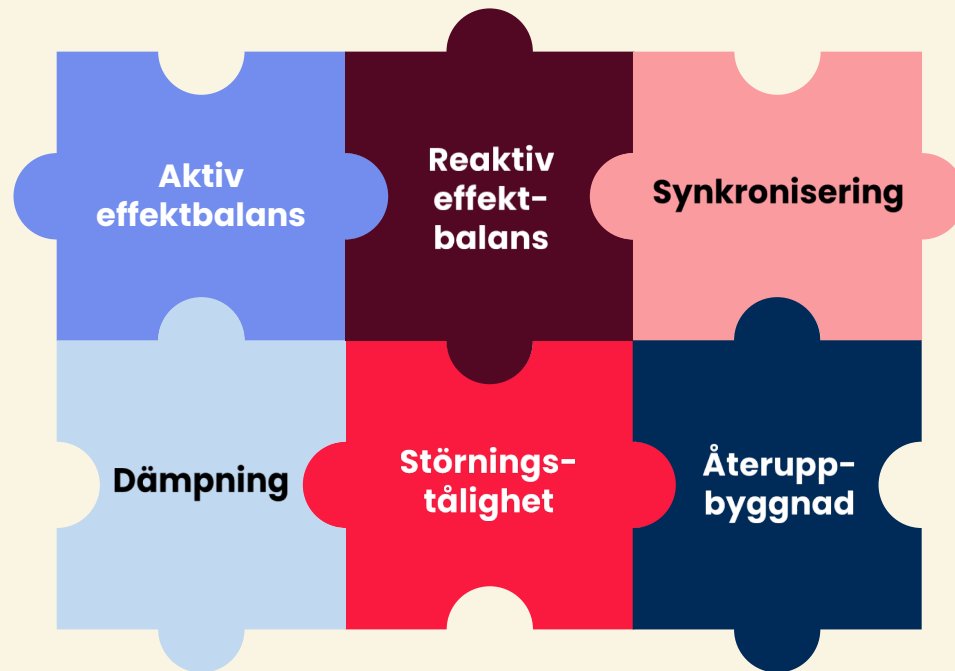


Beskrivning av systembehoven

För att kraftsystemet ska vara driftsäkert även i framtiden behöver ett antal systembehov hanteras.

I den här rapporten beskrivs systembehoven utifrån sex kategorier: Aktiv effektbalans, Reaktiv effektbalans, Synkronisering, Dämpning, Störningstålighet och Återuppbyggnad.* Behoven har ibland ett visst överlapp och interagerar med varandra.

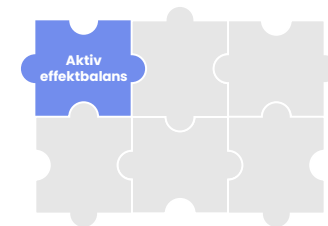
I detta avsnitt kommer för respektive systembehov en beskrivning av behovet, vilka åtgärder som genomförts, utvecklingen i framtiden samt vilka åtgärder som då krävs.



* Indelningen är inspirerad av rapporten [System Needs and Services for Systems with High IBR Penetration](#), Global-PST, 2021



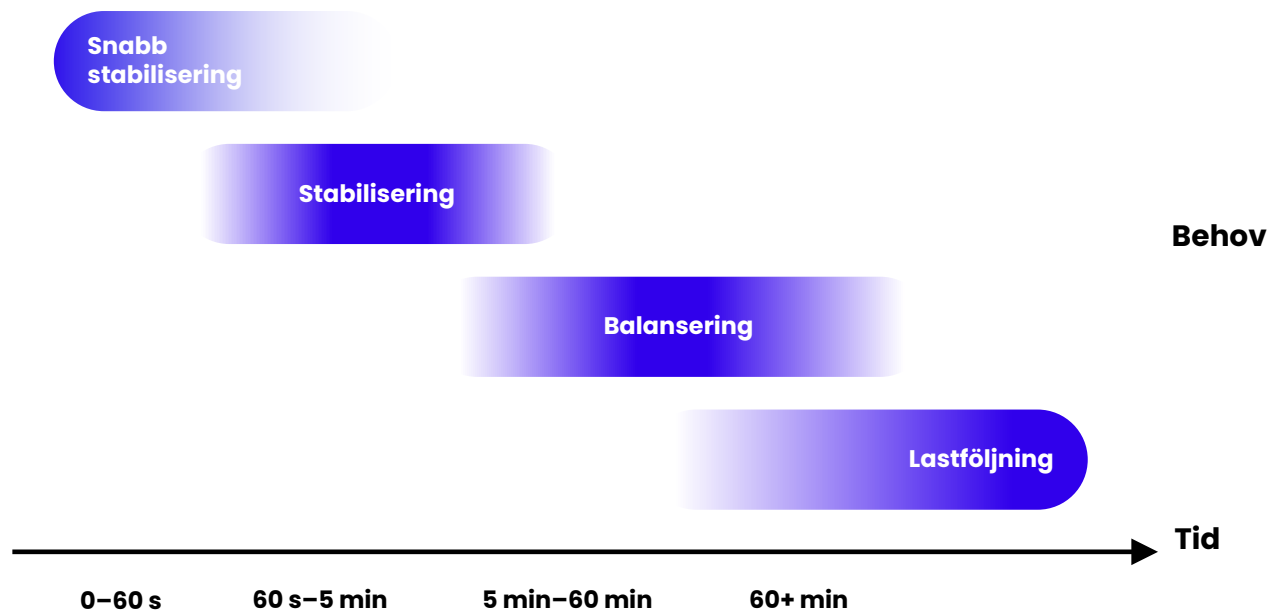
Aktiv effekt och frekvens



Mängden aktiv effekt som produceras måste i varje ögonblick vara lika stor som den mängd effekt som förbrukas. Vid en ändring i aktiv effekt hos produktion eller förbrukning kommer rotationsenergin hos de roterande massorna omedelbart att öka eller minska för att balansera effektändringen. Därefter aktiveras Svenska kraftnäts stabiliseringsreserver för att stabilisera frekvensen, följt av långsammare balanseringsreserver för att återställa jämvikt i planerad produktion och förbrukning samt återställa stabiliseringsreserverna. På de långa tidsskalorna är det elmarknadens uppgift att själv hålla sig i energibalans genom så kallad lastföljning.

En mer djupgående beskrivning av frekvensregleringen i Norden återfinns i rapporten [Overview of Frequency Control in the Nordic Power System](#). Mer information om de åtgärder för aktiv effekt och frekvens som är marknadsbaserade återfinns även i publikationen [Balancing market outlook 2030](#).

Notera att balansavräkningen har övergått till 15 minuters avräkningsperiod (i mars 2025) men att balanserings-behovet trots det ofta sträcker sig över flera 15-minutersperioder och upp till några timmar.





Snabb stabilisering

Beskrivning

Med snabb stabilisering avses behovet av att säkerställa att frekvensen i samband med snabba variationer i aktiv effekt hålls inom fastställda gränser. Den snabba stabiliseringen utförs på de riktigt korta tidskalorna, från hantering av momentana avvikelser upp till ca 1 minut. Historiskt har Svenska kraftnät förlitat sig på de synkrona anläggningarnas rotationsenergi, bidraget från förbrukningsanläggningars frekvensberoende, samt stödtjänsten frekvenshållningsreserv för störningar (FCR-D) för att tillgodose behovet av den snabba stabiliseringen.

Genomförda åtgärder

- Sedan 2020 används den avhjälpande åtgärden snabb frekvensreserv (FFR).
- Verktyg för att övervaka och prognosticera rotationsenergi har införts.
- De tekniska kraven för FCR-D har uppdaterats.
- Kraven för automatisk förbrukningsfrånkoppling (AFK) har reviderats.

Utveckling i framtiden

Den inneboende förmågan hos den mekaniska rotationsenergin kan komma att minska ytterligare över tid, särskilt i händelse av att dagens kärnkraft skulle avvecklas utan att ersättas. Minskningen skulle vissa timmar få konsekvenser för stabiliteten och därför behöva hanteras. Att tillföra mekanisk rotationsenergi skulle då vara till nytta för kraftsystemet, där en framtida utbyggnad av kärnkraften skulle kunna bidra till att upprätthålla stabiliteten.

Svenska kraftnäts bedömning utifrån nuvarande långtidsscenarier är dock att rotationsenergin inte kommer att bli så kritiskt låg att den måste hanteras genom att tillföra mekanisk rotationsenergi, utan att också andra åtgärder kan bidra med motsvarande nytta för snabb stabilisering av frekvensen som exempelvis FFR och syntetisk rotationsenergi från omriktaransluten produktion.

Framtida åtgärder

Driftsäkerheten kan upprätthållas med hjälp av andra förmågor likt dagens FFR, som idag levereras av främst batterier till relativt låg kostnad. I framtiden förväntas de tekniska kraven för FFR behöva revideras i form av en dynamisk FFR för att åtgärden ska vara tekniskt effektiv även vid högre volymer, för överfrekvens, samt vid nöddrift och återuppbyggnad.

Utöver FFR finns även andra möjliga åtgärder, som synkronkompensatorer, synkronkompensatordrift av generatorer och syntetisk rotationsenergi från omriktaransluten produktion.

Vilken åtgärd som i slutändan väljs av Svenska kraftnät och övriga nordiska transmissionsnätoperatörer beror på vad som är samhällsekonomiskt mest gynnsamt i förhållande till det faktiska utfallet för den naturliga rotationsenergin.

Rotationsenergin kan komma att minska ytterligare över tid, vilket vissa timmar skulle få konsekvenser som behöver hanteras.

Det finns ett antal olika åtgärder som kan användas för att hantera konsekvenserna av den minskande rotationsenergin.

De nordiska transmissionsnätoperatörerna väljer åtgärd utifrån samhällsekonomisk nytta.

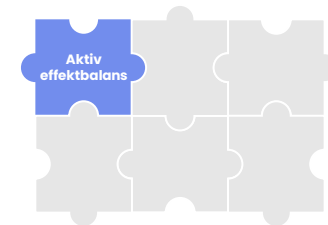
Snabb stabilisering

Stabilisering

Balansering

Lastföljning

○●○○○○○○○ Stabilisering



Beskrivning

Med stabilisering avses behovet av att dämpa variationer i frekvensen och uppnå en stabil nivå, som dock inte nödvändigtvis är 50 Hz. Den del av stabiliseringen som inte inkluderar de snabba behoven agerar på en tidsskala mellan ca 1 och 15 minuter. Stabiliseringen hanteras idag huvudsakligen av frekvenshållningsreserver för normal drift (FCR-N), störningar (FCR-D), frekvensreglering i nöddrift (LFSM och EPC) samt bidraget från förbrukningsanläggningars frekvensberoende. FCR-N och FCR-D är marknadsbaserade produkter, LFSM och EPC tvingande kravställning medan förbrukningens frekvensberoende är en inneboende förmåga.

Genomförda åtgärder

- De tekniska kraven för FCR har reviderats (2023).
- Införande av frekvensreglering i nöddrift (LFSM) hos produktionsanläggningar.
- Förslag till reviderade anslutningskrav för produktion inlämnat till Energimarknadsinspektionen.

Utveckling i framtiden

Volymen FCR-N är idag fixerad till en nivå om 600 MW vilket motsvarar den mängd kontinuerliga och snabba (<15 min) obalanser som historiskt observerats i det nordiska kraftsystemet. I framtiden kan denna volym förväntas öka i takt med att den totala förbrukningen ökar. Det är också troligt att behoven ökar i takt med ökad andel sol- och vindkraft.

I dagsläget utgörs de största enskilda felen av stora kärnkraftsaggregat och HVDC-förbindelser till andra synkronområden. Även i framtiden kommer sådana anläggningar att vara dimensionerande för FCR-D. Det kan exempelvis handla om nya stora kärnkraftsreaktorer, havs- eller landbaserad vindkraft, vätgasanläggningar och HVDC-förbindelser.

Den främsta källan till frekvensreglering i nöddrift (LFSM), särskilt när det gäller för uppregling, är idag vattenkraften som ofta har hög reglerbarhet i både uppåt- och nedåtriktningen. I framtiden kan tillgången

på dessa förmågor för nöddrift komma att försämrast i takt med att andelen produktion som ofta ligger nära maxproduktion och har sämre reglerbarhet ökar, exempelvis kärn-, sol- och vindkraft.

Framtida åtgärder

Införande av LFSM hos förbrukning, energilager och HVDC-förbindelser.

Tillkommande produktion och förbrukning med energilager behöver ha förmåga till frekvensreglering.

Kravställning behöver utökas för att säkerställa tillräckliga förmågor vid nöddrift och återuppbyggnad.

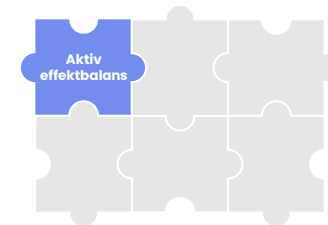
Utökad kravställning krävs också för förmågor hos stora förbrukningsanläggningar, energilager och variabel produktion.

Snabb stabilisering

Stabilisering

Balansering

Lastföljning



Balansering

Beskrivning

Med balansering avses behovet av att frekvensen över tid ska hålla en medelnivå om 50 Hz. Då balanseringen avser frekvensens medelvärde utförs den på lite längre tidshorisont, från ca 5 minuter och upp till några timmar. Balanseringen sköts huvudsakligen med hjälp av automatisk respektive manuell frekvensåterställningsreserv (aFRR respektive mFRR). Reserverna dimensioneras för att hantera obalanser dels vid normaldrift, dels i samband med dimensionerande fel.

Genomförda åtgärder

- Tekniska krav för stödtjänster från resurser med variabel produktion eller förbrukning har införts.
- Kapacitetsmarknader för aFRR och mFRR för att säkra tillgång på reglerkapacitet.
- Områdesbaserad balansering och energimarknad för mFRR inom ramen för uppdaterad nordisk balanseringsmodell (NBM).

Utveckling i framtiden

När det gäller dimensionerande fel förväntas utvecklingen vara lik det som beskrivits för stabiliseringen, där dimensioneringen utgår från stora kärnkraftsreaktorer, havs- eller landbaserad vindkraft, vätgasanläggningar och HVDC-förbindelser. Även avseende normala obalanser är utvecklingen lik det som redan beskrivits, där obalanserna förväntas öka i takt med att elanvändningen ökar. Även en ökning av mängden sol- och vindkraft förväntas bidra till ökade behov av balansering, då resurser med variabel produktion ofta bidrar med betydande obalanser på tidsskalen för balansering (>5 min).

Traditionellt har en stor del av regleringen skötts av vattenkraften, som dock riskerar att inte räcka till i takt med att förbrukningen och obalanserna ökar samtidigt som vattenkraftens relativa andel sjunker i ett kraftsystem med ökad förbrukning. Att vattenkraften ska förses med moderna miljövillkor innebär att vattenkraftens förmåga att bidra till balansering kommer att påverkas negativt.*

Framtida åtgärder

När vattenkraftens relativa andel minskar är det viktigt att alla tillkommande större resurser, exempelvis kärnkraft, vindkraft och vätgasproduktion bidrar i förhållande till mängd och förmåga. Dessa resurser behöver ha den tekniska förmågan att bidra med reglering och balansering för att säkra ett tillräckligt utbud av både upp- och nedreglering. Detta kan medföra ett behov av anslutningskrav kring teknisk förmåga och kanske också lager i fallet vätgas. Därtill är det viktigt att marknader, riskdelningsmodeller och ekonomiska incitament utformas för att främja deltagande i balanseringen.

Det är viktigt att alla tillkommande större resurser, exempelvis kärnkraft, vindkraft och vätgasproduktion, bidrar med balanseringsförmåga i förhållande till sin andel av produktion och elanvändning.

Det kan komma att uppstå ett behov av utökade anslutningskrav kring teknisk förmåga till balansering för tillkommande anläggningar.

Vattenkraftens förmåga att bidra till balansering kommer påverkas negativt av att den ska förses med moderna miljövillkor.

Snabb stabilisering

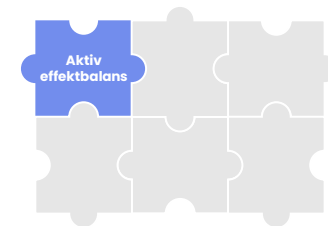
Stabilisering

Balansering

Lastföljning



Lastföljning



Beskrivning

Med lastföljning avses förmågan hos elmarknaden att via dagenföre- och intradagmarknaderna sköta handeln mellan aktörer för att hamna i planerad balans inför drifttimmen. Lastföljningen ligger utanför Svenska kraftnäts direkta ansvarsområde, men är av relevans för frekvenshållningen då samma flexibilitet hos förbrukning och produktion utgör grunden för utbudet både på stödtjänstmarknaderna och för lastföljningen. Således finns det en koppling mellan utbud och efterfrågan på samtliga marknader för aktiv effekt.

Utveckling i framtiden

Idag hanterar vattenkraften en stor del av lastföljningen i systemet på både kort och lång sikt. En stor del av den tillkommande produktionen kommer att vara väderberoende vilket begränsar planerbarheten och möjligheten till att vara flexibel.

Residuallasten, som förenklat kan förklaras med den förbrukning som måste täckas av planerbar produktion, kommer att variera än mer med ökad andel förnybar produktion.

Framtida åtgärder

För att i framtiden ha tillräckliga resurser för lastföljning är det av vikt att tillkommande produktion och förbrukning har möjlighet till att vara flexibel. För att möta det behovet behövs lämplig förmåga och relevanta incitament hos både tillkommande produktion och ny förbrukning liknande det som beskrivits för balansering.

En flexibel kärnkraftsproduktion kan komma att utgöra en viktig del av den svenska elmarknaden, särskilt om det byggs ny kärnkraft i Sverige. Lastföljning i kärnkraftverk har förekommit i Sverige, främst under 80- och 90-talet. För att möjliggöra flexibel kärnkraftsproduktion är det viktigt att utformningen av en eventuell ersättningsmekanism för ny kärnkraft inte eliminerar incitament eller möjligheter att bidra med flexibilitet.

Batterier förväntas inte utgöra någon stor källa till lastföljningen, särskilt på längre tidshorisonter (vecka, månad, år) då energivolymen är begränsad.

På dygnsnivå kan dock batterier ge ett visst bidrag.

Att vattenkraften ska förses med moderna miljövillkor innebär, likt för balanseringen, att förmågan till lastföljning påverkas negativt. Det är därför viktigt att de stora anläggningar för produktion och förbrukning som byggs i tillräcklig omfattning har den flexibilitet som krävs för att tillsammans med import säkerställa tillräcklig förmåga till lastföljning.

Tillkommande produktion och förbrukning behöver ha förmåga till att vara flexibel.

Vid etablering av ny kärnkraft är det viktigt att inte eliminera incitament eller möjligheter att bidra med flexibilitet.

Batterier förväntas inte utgöra någon stor källa till lastföljningen på längre tidshorisonter.

Att vattenkraften ska förses med moderna miljövillkor innebär att förmågan till lastföljning påverkas negativt.

Snabb stabilisering

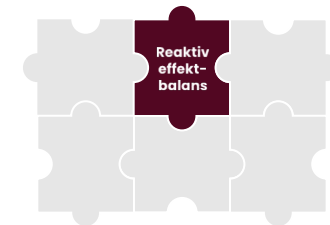
Stabilisering

Balansering

Lastföljning



Reaktiv effekt och spänning



I kraftsystemet behöver spänningar och flöden av reaktiv effekt hela tiden övervakas och styrs för att möjliggöra en driftsäker överföring av aktiv effekt.

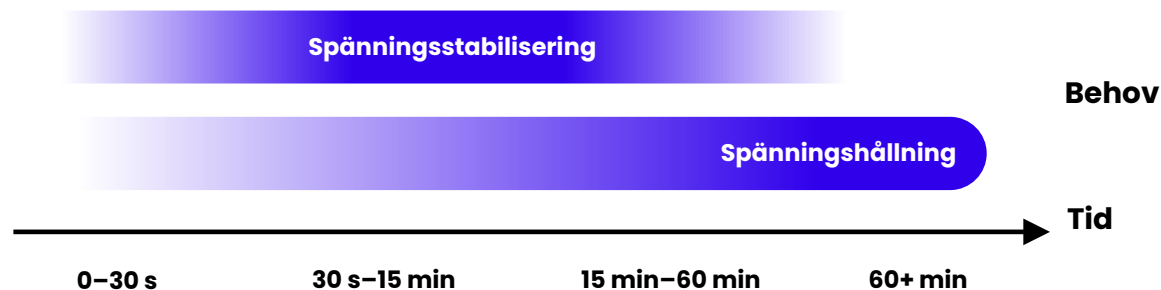
Spänningen i överföringssystemet styrs främst genom att reglera den reaktiva effekten men spänningen påverkas också mycket av överföringen och flödet av aktiv effekt. Det kan därför både behöva tillföras reaktiv effekt under kvällens höglastperiod för att hålla spänningen uppe och konsumeras under natten då överföringen kan vara låg för att hålla spänningen nere.

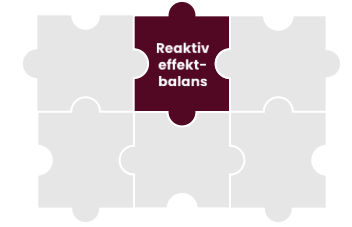
Kraftsystemets behov är framförallt relaterade till spänning, medan förmågan att hantera och styra reaktiv effekt kan betraktas som ett verktyg för att nå en god spänningsprestanda.

Behov och förmågor relaterade till reaktiv effekt och spänning kan precis som för aktiv effekt och frekvens delas in i olika tidsskalor. Uppdelningen kan göras på flera olika sätt utifrån önskad detaljeringsgrad. I denna rapport är fokus på behoven spänningsstabilisering och spänningshållning som beskrivs på efterföljande sidor.

Reaktiv effekt

Den del av den elektriska effekten som inte utför något arbete och där spänning och ström inte är i fas kallas reaktiv effekt. Ledningar i kraftsystemet producerar reaktiv effekt när de överför lite eller ingen aktiv effekt. Ju större den aktiva effektöverföringen är desto mer reaktiv effekt konsumerar ledningarna. Reaktiv effekt har en stark påverkan på kraftsystemets spänningar. Tillförsel av reaktiv effekt höjer spänningen och konsumtion sänker spänningen.





Spänningsstabilisering

Beskrivning

Spänningsstabilisering avser behovet att i samtliga punkter upprätthålla stabila och acceptabla spänningar och kunna återgå till ett jämviktsläge efter att ha utsatts för en störning. Spänningsstabilisering behövs från de riktigt korta tidsskalorna upp till åtminstone 15 minuter. Om behovet inte bedöms kunna tillgodoses i driftskedet begränsas den driftsäkra överföringskapaciteten. Bortkoppling av förbrukning och produktion kan ske till följd av en störning där behovet de facto inte kan tillgodoses.

Historiskt har spänningsstabiliteten framförallt upprätthållits av synkrona produktionsanläggningar som spänningsreglerar och är direktanslutna till transmissionsnätet. Numera är det under vissa timmar få sådana anläggningar i drift, vilket då medför en minskad spänningsreglerande förmåga.

Genomförda åtgärder

- Svenska kraftnät har investerat i samt upphandlat olika spänningsreglerande resurser, exempelvis tre STATCOMs (statisk kompensator för reaktiv effekt).
- Nya principer för styrning av spänning och reaktiv effekt har utvecklats tillsammans med regionnätsföretagen.

- Förslag på förbättrade anslutningskrav för produktion och införande av krav för batterilager har lämnats till Energimarknadsinspektionen.*

Utveckling i framtiden

Storskalig omriktaransluten produktion har precis som synkron produktion en god inneboende förmåga till spänningsreglering. Idag nyttjas inte denna förmåga hos dessa anläggningar då de är anslutna till distributionssystemen, och de bidrar därför inte till spänningsstabiliseringen.

För att framöver säkerställa spänningsstabiliseringen, på ett för samhället kostnadseffektivt sätt, behöver förmågan till spänningsreglering som finns hos storskalig produktion ansluten till distributionssystem nyttjas.

Denna förmåga behöver också komma hela kraftsystemet till godo. Detta innebär att lindningskopplarreglering på vissa transformatorer i distributionssystemen (en åtgärd som styr hur mycket spänningen omvandlas i transformatorn mellan till exempel 400 kV- och 130 kV-näten) behöver koordineras och styrs på nya sätt.

Framtida åtgärder

- Fortsatta analyser och investeringar i egna spänningsreglerande komponenter, utifrån olika anslutnings- och systembehov. Vilka investeringar som behöver göras beror framförallt på var ny produktion och förbrukning ansluts.
- Fortsatt operativt och strategiskt samarbete med regionnätsföretagen. Det bör bland annat införas avtal som formaliserar gjorda överenskommelser om att storskalig produktion ansluten till distributionssystem ska spänningsreglera och att lindningskopplare ska koordineras.
- Via transmissionsnätstariffen planeras för att 2027 införa en frivillig möjlighet till ekonomisk ersättning för de som bidrar med spänningsreglerande beteende i anslutningspunkten till överföringssystemet.
- Nya verktyg för övervakning och uppföljning av förbättrade nyckeltal, utifrån både mätdata och utökad datautbyte med aktörer, implementeras löpande.

Både omriktaransluten produktion och synkron produktion har en god förmåga till spänningsreglering.

Förmågan till spänningsreglering hos produktion ansluten till distributionssystem behöver börja nyttjas.

Spänningsstabilisering

Spänningshållning



Spänningshållning

Beskrivning

Med spänningshållning avses behovet att i samtliga punkter i elnätet säkerställa att spänningen över tid hålls på en jämn nivå inom driftsäkerhetsgränserna. Spänningen ska med andra ord inte vara för hög eller för låg i enskilda punkter och inte ha stora avvikelser mellan olika punkter. Behovet är relevant för de längre tidskalorna, från minuter och uppåt.

Anläggningar i kraftsystemet är konstruerade för ett visst spänningsintervall. Avvikelser utanför acceptabla spänningsnivåer ger upphov till försämrad effektivitet och kan medföra förkortad livslängd och öka risken för haverier.

Reaktiva resurser

Reaktiva resurser är dels statiska resurser såsom shuntreaktorer samt shunt- och seriekondensatorer där framförallt shuntkomponenter är förhållandevis billiga sett till mängd reaktiv effekt per krona. Som reaktiva resurser räknas även dynamiskt spänningsreglerande resurser såsom produktionsanläggningar, STATCOMs, synkronkompensatorer och batterilager. Dessa är dyrare men bidrar i högre grad även till behovet av spänningsstabilisering.

Spänningsstabilisering

Spänningshållning

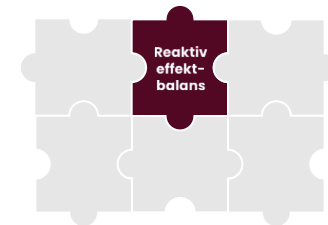
Genomförda åtgärder

- Svenska kraftnät har investerat i olika reaktiva resurser för att tillföra nödvändiga förmågor. 2024 ingicks exempelvis ett avtal för leverans av ett stort antal shuntreaktorer (som bidrar till att sänka spänningen) för att täcka dagens behov samt behov till följd av planerade nätinvesteringar och anslutningar fram till 2032.
- Åtgärder som lyfts inom behovet spänningsstabilisering bidrar även till att tillgodose behovet spänningshållning.

Utveckling i framtiden

Mer aktiv effekt som behöver överföras längre sträckor i elnäten medför ett behov av fler reaktiva resurser som kan kompensera för spänningsvariationer som uppstår till följd av det aktiva effektflödet.

I takt med att kraftsystemets flöden förändras framöver behöver både placeringen och mängden av reaktiva resurser löpande ses över.



Framtida åtgärder

- Från 2027 införs en möjlighet att utdela vite till aktörer som inte klarar av att begränsa sitt reaktivt effektutbyte med transmissionsnätet om detta begärts av Svenska kraftnät. Genom mindre ogynnsamma reaktiva effektutbyten fås förbättrad spänningshållning.
- Fortsatta investeringar i egna reaktiva resurser krävs. Behovet drivs i första hand av transmissionsnätets utveckling och var ny produktion och förbrukning ansluts. Behovet är nästintill oberoende av vilken typ av produktion eller förbrukning som ansluts.
- Därutöver bidrar framtida åtgärder som lyfts inom behovet spänningsstabilisering även till att tillgodose behovet spänningshållning.

Mer aktiv effekt som ska överföras längre sträckor kräver fler reaktiva resurser.

Den viktigaste åtgärden framöver är fortsatta investeringar i Svenska kraftnäts egna reaktiva resurser.



Synkronisering

Beskrivning

Med synkronisering avses behovet av att många olika anläggningar och komponenter ska samverka i ett gemensamt och sammanhållet system. För att kraftsystemet ska fungera stabilt måste både synkrogeneratorer och omriktaranslutna resurser förbli synkroniserade med kraftsystemet. Detta innebär att de måste kunna hantera olika störningar och variation i till exempel spänning och frekvens i anslutningspunkten utan att kopplas bort.

En synkrogenerators naturliga mekaniska rotationsenergi bidrar till synkronisering bland annat genom att den inte momentant ändrar rotationshastighet vid en störning. Under en kraftig spänningssänkning i anslutningspunkten minskar synkrogenerators möjlighet att leverera elektrisk effekt till nätet och generatorns rotationshastighet ökar. Spänningen i anslutningspunkten behöver återhämta sig tillräckligt snabbt för att ökningen i rotationshastigheten ska kunna bromsas upp och generatoren förbli synkroniserad med kraftsystemet.

Konventionellt styrda omriktare synkroniserar med kraftsystemet genom mätningar i anslutningspunkten. Omriktaren anpassar sig baserat på mätningen för att uppnå önskad inmatning av effekt. På så sätt "följer" omriktaren nätet, varför den styrningen av omriktare kallas för nätföljande ("Grid Following"). Om anslutningspunkten är svag blir det svårare för omriktaren att hinna anpassa sig eftersom till exempel spänningen då ändras både mer och snabbare. Ett bättre sätt att styra omriktare är så kallad nätformande styrning ("Grid Forming") som förenklat synkroniserar omriktaren genom intern mätning. Styrningen ger bland annat bättre synkronisering av omriktare mot svagare nät men också möjlighet att bidra till ö-drift och nättåteruppbyggnad.

Genomförda åtgärder

Anslutningskrav är utvecklade för omriktaranslutna anläggningar där synkronisering säkerställs via andra förmågor till exempel genom ökad feltålighet.

Utveckling i framtiden

Omriktare som anslutit till kraftsystemet har till stor del implementerat nätföljande styrning vilket inte tillgängliggjort flera möjliga förmågor från omriktarna.

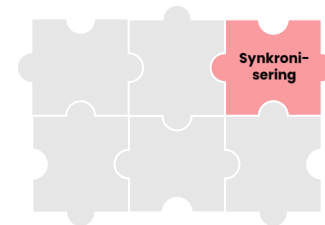
Ökat behov av förmågor i kraftsystemet i allmänhet och från omriktare i synnerhet gör att förmågor via nätformande styrning kommer att behövas. Till stor del kan detta ske via kravställning vid anslutning.

Framtida åtgärder

- Svenska kraftnät arbetar med att utveckla kravställning och överensstämmelseprov för nätformande omriktare. I ett första steg utvecklas kravställning för HVDC-omriktare (högspänd likström) och STATCOM (statisk kompensator för reaktiv effekt).
- Nästa steg är att ta fram kravställningen för omriktare till batterilager och sol- och vindkraftsomriktare. Kravställningen syftar bland annat till att omriktare ska bibehålla synkronism mot nätet under olika förutsättningar i anslutningspunkten och vid störningar.

För att säkerställa en robust synkronisering av omriktare framöver är kravställning för nätformande, och till viss del nätföljande synkronisering, den viktigaste åtgärden.

För en gemensam kravställning av nätformande egenskaper krävs fortsatt samarbete och samverkan inom Norden och med övriga delar av kraftbranschen.



○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ Dämpning

Beskrivning

I ett kraftsystem varierar ständigt frekvens och spänning. I samband med en störning kommer de att påverkas och röra sig mot ett nytt jämviktsläge. I vissa fall kan förutsättningarna i kraftsystemet leda till att det nya läget inte nås direkt utan det uppstår en pendling. Om pendlingen är dämpad avtar den och svänger in till det nya jämviktsläget, om den är odämpad växer den och kan orsaka ytterligare störningar. För att dämpningen ska anses vara god måste pendlingen även klinga av tillräckligt snabbt.

I ett kraftsystem dominerat av synkrogeneratorer är pendlingar relativt långsamma. I ett kraftsystem dominerat av omriktare finns risk för snabbare pendlingar. Denna typ av pendlingar kallas resonans- och omriktarstabilitet. Det finns därför ett behov att säkerställa dämpning i ett mycket bredare frekvensspektrum, vilket ställer nya krav på styrning och metoder för analys och övervakning både under drift och för planering. Samtidigt behöver utveckling fortsatt ske med åtgärder för fenomen inom de klassiska stabilitetskategorierna.

Genomförda åtgärder

- Kravställning på omriktaransluten produktion och förbrukning vid anslutning har utvecklats.

- Framtagen process för fördjupade analyser av snabba pendlingar och interaktioner.
- Nya tekniska krav för FCR innehåller krav på dämpning av frekvenspendlingar.

Utveckling i framtiden

Andelen omriktare i kraftsystemet ökar framöver och med det ökar komplexiteten. Traditionella metoder för att avgöra risken för otillräcklig dämpning av snabba pendlingar är inte tillämpliga för system med hög andel omriktare och nya metoder behöver utvecklas.

Framtida åtgärder

- För att omriktare ska bidra med förmågor är en kravställning för nätformande egenskaper under utveckling. Kravställningen innefattar bland annat omriktarens dynamiska egenskaper till exempel dämpning av snabba pendlingar. Arbetet sker i samarbete med de andra nordiska systemoperatörerna.
- Arbete pågår med att vidta åtgärder för att kunna övervaka och förebygga resonans- och omriktarstabilitet. En mätinfrastruktur behöver utvecklas med en bandbredd som har möjlighet att observera dessa stabilitetsfenomen. Algoritmer behöver utvecklas för att effektivt kunna identifiera

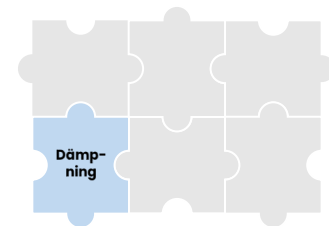
fenomenen och vidta åtgärder och gränsvärden överskrids.

- Arbete pågår med verifiering och förvaltning av modeller för att mer noggrant kunna genomföra detaljerade analyser och identifiera risker för resonans- och omriktarstabilitet.
- Arbete pågår med att revidera kravställningen avseende dämpning av pendlingar. För omriktaranslutna anläggningar innebär det en uppdaterad kravbild på dämpfunktion, så kallad POD (Power Oscillation Damping), för att förbättra deras bidrag till dämpningen.
- En möjlig revidering av kraven för FFR utreds i form av en Dynamisk FFR med syfte att införa förmåga till dämpning av snabba frekvenspendlingar.

Tydlig kravställning på omriktare och hur de interagerar med kraftsystemet är viktigt för att säkerställa dämpning.

Åtgärder behöver vidtas för att kunna övervaka och förebygga resonans- och omriktarinstabilitet.

Svenska kraftnät ser behov av att i större utsträckning kunna erhålla modeller och data med öppet innehåll för att kunna genomföra olika typer av detaljerade systemstudier.





Störningstålighet

Beskrivning

Överföringssystemets dimensioneringsregler innehåller N-1-kriteriet, vilket innebär att systemet ska dimensioneras för att vara störningståligt och klara ett bortfall av en godtycklig systemkomponent. Störningstålighet avser även behovet av att anläggningar och komponenter som är anslutna till kraftsystemet ska kunna förbi anslutna, behålla synkroniseringen, i händelse av att exempelvis frekvens eller spänning avviker från dess normala värde.

För att säkerställa att fel, till exempel en kortslutning i kraftsystemet, hanteras korrekt är det viktigt att kunna koppla bort felaktiga delar snabbt och säkert. Vid ett fel spelar den felström som matas in av olika anläggningar stor roll för hur stor spridning störningen får i nätet. Felström behövs även för att skyddssystemen ska kunna detektera och koppla bort fel på ett korrekt sätt.

Genomförda åtgärder

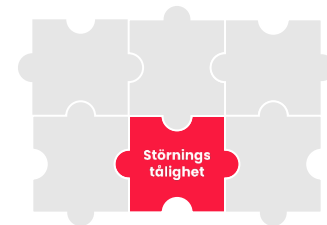
- Pågående uppdatering av anslutningskrav för generatorer och omriktare gällande förmågan feltålighet.

- Pågående arbete med införande av anslutningskrav för förbrukningsanläggningar gällande störningstålighet avseende tålighet mot fel, överspänningar och frekvensvariationer.
- Kravställning gällande felströmsinmatning från omriktare är utvecklat.

Utveckling i framtiden

Idag är det i första hand produktionsanläggningar som omfattas av krav om störningstålighet. I takt med ökad förbrukning och att mycket stora förbrukningsanläggningar tillkommer, i form av exempelvis storskalig vätgasproduktion, är det viktigt att även stora förbrukningsanläggningar har en god störningstålighet.

En del stora förbrukningsanläggningar kommer att ansluta inom relativt avgränsade geografiska områden i kluster. En störning i eller i närheten av ett sådant område kan, om förbrukningsanläggningarna saknar tillräcklig förmåga att motstå störningar, leda till mer omfattande störningar med betydligt större geografisk spridning.



Svenska kraftnät genomför kontinuerligt analyser av felströmsinmatningen i olika punkter av nätet, både för nuvarande och förväntade nivåer under de kommande åren. Det inkluderar även analyser av spänningsåterhämtningen efter fel, där felströmsinmatningen är en av de faktorer som påverkar förloppet. Nätutbyggnad som ger ett mer sammankopplat kraftsystem bidrar till att hålla felströmsnivån uppe och det gör även rätt utformad kravställning för omriktare. Det är även viktigt att säkerställa så att felströmsnivåerna inte bli högre än vad anläggningarna är dimensionerade för.

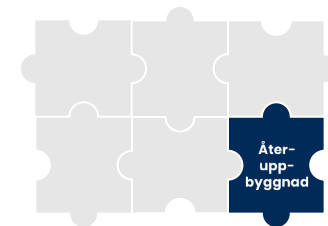
Framtida åtgärder

Svenska kraftnät verkar för vidare utveckling och formalisering av bland annat kravställningen på förbrukningsanläggningar gällande störningstålighet.

Utvidgning av kravställningen på störningstålighet till att även omfatta förbrukningsanläggningar. Stora förbrukningsanläggningar innebär nya typer av felfall och deras förmåga till störningstålighet är viktig.

Koordinering av skyddsinställningar i anslutningar av stora förbrukningsanläggningar för att undvika felaktig fränkoppling.

Återuppbyggnad



Beskrivning

Om kraftsystemets driftsäkerhetsgränser överskrider kan det leda till en delvis eller fullständig kollaps av kraftsystemet. I en sådan situation måste kraftsystemet snabbt kunna återuppbas, genom att återansluta anläggningar, elproduktion och elanvändning, och med bibehållen stabilitet återställa kraftsystemet till normaldrift.

Förordningen Nödsituationer och återuppbyggnad (ER) ställer krav för att säkerställa en tillförlitlig, effektiv och snabb återuppbyggnad av kraftsystemet. Målet för återuppbyggnaden är att på ett säkert och effektivt sätt komma tillbaka till normaldriftstånd för att därmed minimera de ekonomiska och sociala konsekvenserna för samhället.

Återuppbyggnad kräver särskilda förmågor som dödnätsstart, och exempelvis frekvensreglering med anpassad inställning för att fungera i olika faser av uppbyggnaden. Återuppbyggnad underlättas av produktion som är planerbar och särskilt om den är reglerbar. I Sverige utgör vattenkraften en bärande del av återuppbyggnadsplanen, särskilt i dess inledande faser. Under pågående återuppbyggnad men även under andra typer av kriser kan ö-drift av enskilda regioner vara aktuellt av beredskapsskäl.

Det är viktigt att involverade parter har en tydlig förståelse för sina roller och ansvar under återuppbyggnadsprocessen. Det finns behov av utbildning och övningar så att berörda parter är väl förberedda och kan agera korrekt.

Gennomförda åtgärder

Svenska kraftnät har tagit fram en återuppbyggnadsplan och en provningsplan. Provningsplanen används för att regelbundet bedöma om de åtgärder som ingår i återuppbyggnadsplanerna får avsedd effekt.

Utveckling i framtiden

Den mängd elanvändning som behöver återanslutas efter ett nätsammanbrott kommer att öka i takt med den ökade elanvändning som kommer med elektrifieringen. När vattenkraftens relativa andel av produktionen sjunker kommer andra kraftslag att behöva bidra med fler förmågor, och även behövas tidigare i återuppbyggnadsprocessen för att elproduktionen ska räcka till.

Ny kärnkraft i Sverige kommer också vara en viktig resurs och likaså vindkraften, särskilt om ny kärnkraft utblir. En anläggning med stor elanvändning kan komma att behöva delta aktivt i återuppbyggnaden till exempel genom flexibilitet och att starta verksamheten stegvis. Även gasturbiner skulle kunna bidra.

Framtida åtgärder

- Utökat deltagande från variabel produktion och anläggningar med stor elanvändning.
- Med allt större mängd distribuerad produktion behövs bättre verktyg och prognoser för att bättre förutse följden av att ansluta olika delar av nätet, utan att riskera återuppbyggnaden.
- Utökad kravställning på förmågor, bemanning och kompetens hos nätföretagen och hos innehavare av variabel produktion och stor förbrukning.

Förmågan till dödnätsstart behöver vidareutvecklas

Gennomföra utbildningar och övningar med branschen.

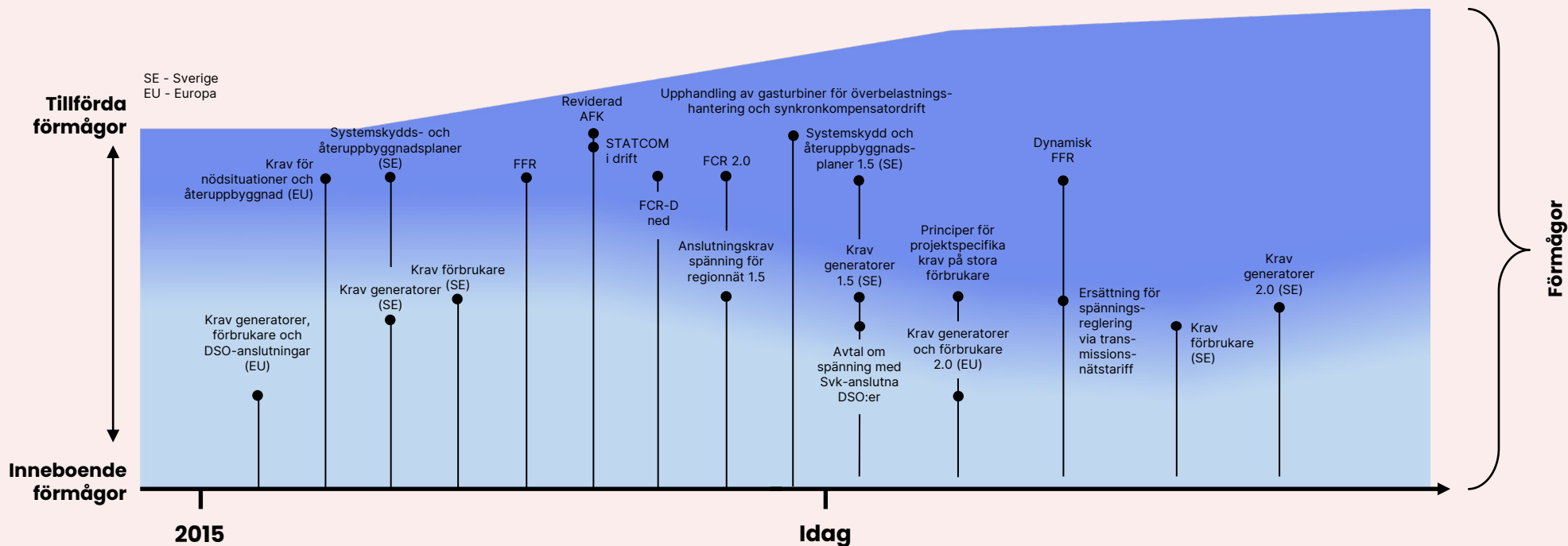
Säkra tillgång på befintliga resurser som är viktiga för återuppbyggnad (exempelvis gasturbiner).

Utreda möjligheter att tillföra ytterligare resurser som kan bidra till återuppbyggnad (exempelvis vindkraft).



Översikt av implementerade och framtida åtgärder

När behoven ökar behöver tillgängliga förmågor öka för att bibehålla kraftsystemets driftsäkerhet och robusthet. Flera typer av åtgärder krävs för att tillföra ytterligare förmågor och för att upprätthålla de inneboende förmågorna. Svenska kraftnät har tillgång till olika verktyg för att åstadkomma detta: investeringar i egen utrustning och nät, kravställning kopplade till anslutning, drift och marknad eller via ekonomiska incitament och anskaffning av förmågor. Figuren ger en översikt av implementerade åtgärder fram till idag samt de framtida åtgärder vi i nuläget känner till.





Ordlista

TSO – Transmission System Operator/ systemansvarig för överföringssystem, innehavare och driftsäkerhetsansvarig för transmissionsnät

DSO – Distribution System Operator/ systemansvarig för distributionssystem, innehavare och driftsäkerhetsansvarig för regionnät och lokalnät

FFR – Fast Frequency Reserve/snabb frekvensreserv

FCR-D – Frequency Containment Reserve for disturbance/frekvenshållningsreserv för störningar

FCR-N – Frequency Containment Reserve for normal operation/frekvenshållningsreserv i normaldrift

aFFR – automatic Frequency Restoration Reserve

mFFR – manual Frequency Restoration Reserve

AFK – Automatisk Förbrukningsfrånkoppling

LFSM – Limited Frequency Sensitivity Mode, frekvensreglering i nöddrift

EPC – Emergency Power Control, systemvärn för HVDC-anläggningar

HVDC – High Voltage Direct Current, överföring via högspänd likström

NBM – Nordic Balancing Model, en ny nordisk balanseringsmodell

STATCOM – Static Synchronous Compensator, anläggning för snabb dynamisk stöttning av växelströmsnät

POD – Power Oscillation Damping, funktion hos omriktaranslutna anläggningar för att dämpa effektpendlingar i kraftsystemet

