

RAPPORT

# Analysbehov vid anslutning av elproduktion nära kärnkraftverk

En rapport utförd på uppdrag av de svenska kärnkraftverken

Rapport nr.: 10393914, Rev. R01

Dokument nr.: 10393914-R01

Datum: 2023-03-10



Projektnamn: Rapport  
Rapporttitel: Analysbehov vid anslutning av elproduktion nära kärnkraftverk  
Uppdragsgivare: En rapport utförd på uppdrag av de svenska kärnkraftverken  
Energiföretagen Sverige  
Olof Palmes Gata 31  
101 53 Stockholm  
Kontaktperson: Carl Berglöf  
[carl.berglof@energiforetagen.se](mailto:carl.berglof@energiforetagen.se)  
Tel: 0701-644446  
Datum: 2023-03-10  
Projekt nr.: 10393914  
Org. enhet: PSP Northern Europe  
Rapport nr.: 10393914, Rev. R01  
Dokument nr.: 10393914-R01

DNV Energy Systems  
PSP Northern Europe  
DNV Sweden AB  
Elektrogatan 10  
171 54 Solna  
Org. Nr.: SE556104326501


Utfört av:

Verifierat av:

Godkänt av:

Henrik Hemark  
Senior Engineer

Lars Messing  
Senior Principal Engineer

  
Lucas Thomée  
Team Lead

Daniel Karlsson  
Senior Principal Engineer

Copyright © DNV 2023. All rights reserved. Unless otherwise agreed in writing: (i) This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise; (ii) The content of this publication shall be kept confidential by the customer; (iii) No third party may rely on its contents; and (iv) DNV undertakes no duty of care toward any third party. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited.

DNV distribution:

- ÖPPEN. Fri distribution, internt och externt.  
 INTERN. Fri distribution internt inom DNV.  
 Enligt KOMMERSIELLA villkor / kontrakt.  
 KONFIDENTIELL. Distribution inom DNV enligt villkor / kontrakt.  
 HEMLIG. Endast auktoriserad tillgång.

\*Distributionslista:

Nyckelord:

Analys, beräkningar, modelleringar, simuleringar, driftsäkerhet, omriktaransluten elproduktion, kärnkraft

Rev.nr.	Datum	Anledning för utgåva	Utfört av	Verifierat av	Godkänt av
01	2023-03-10	Första utgåvan	D.K., H.H.	L.M.	L.T.

## SAMMANFATTNING

Föreliggande rapport beskriver de *analyser, beräkningar, modelleringar, simuleringar* och *verifieringar* som måste utföras, för att säkerställa driftsäkerheten i det nationella elsystemet och produktionsmiljön för befintliga anläggningar i samband med nyetablering av elproduktion i närheten av något av de befintliga kärnkraftverken. Syftet med rapporten är att så långt möjligt säkerställa att befintlig kärnkraftsproduktion och tillkommande omriktaranslutna anläggningar för förnybar elproduktion kan samverka över tid på ett driftsäkert sätt och att dialog och samverkan som inkluderar berörda kärnkraftverk kommer till stånd på ett tidigt stadium. Rapporten inleds med bakgrund, förutsättningar och en lägesbeskrivning av nuvarande förhållanden och kända utbyggnadsplaner. Därefter beskrivs omriktaranslutna produktion och dess egenskaper samt kritiska förhållanden i kärnkraftverkens anslutningspunkter, följt av svenska och internationella exempel och erfarenheter av omriktaranslutna effektinmatning.

Studier och analyser som måste genomföras redovisas i rapporten inom följande grupper:

- Nättillgänglighet
- Elkvalitet
- Plötslig händelse i kraftsystemet, såsom fel eller koppling
- Plötslig händelse i tillkommande produktionsanläggning, såsom fel eller koppling
- Resonans och dämpning
- Stabilitet och feltolerans inom tillkommande anläggning

Speciell uppmärksam ska ägnas åt att säkerställa att reglersystemen i den tillkommande anläggningen samverkar på ett robust och driftsäkert sätt med existerande reglersystem, särskilt när det gäller reglering av aktiv och reaktiv effekt samt pendlingsdämpning. HVDC-länkar har t ex vid flera tillfällen plötsligt bytt effektriktning till följd av ofullkomligheter i reglersystemen.

Krav på analysverktyg och modeller redovisas i ett särskilt kapitel. Såväl modeller som analysverktyg ska vara lämpliga för studium av det fenomen man avser att analysera. Modellerna som används vid de olika analyserna ska omfatta lämpliga delar av kraftsystemet, den tillkommande produktionsanläggningen och det betraktade kärnkraftverket, för respektive analys. Vidare ska detaljeringsnivå på modellerna vara tillräcklig för att analysresultatet ska vara tillförlitligt. Analysverktyg och modeller ska, så långt möjligt, vara internationellt erkända, verifierade och beprövade.

Kärnkraftverken har, i sin egenskap av så kallad "betydande nätanvändare" och oundgänglig del av det svenska elsystemet, ett ansvar för att säkerställa fortsatt hög tillförlitlighet i kärnkraftverkens anslutningspunkter mot stamnätet och respektive startnät. Föreliggande rapport har tillkommit på kärnkraftverkens initiativ och ska vara en hjälp för alla parter i samband med nyetablering av omriktaranslutna produktion, för att säkerställa fortsatt hög driftsäkerhet och tillgänglighet i elsystemets alla delar. Denna säkerställning görs på olika nivåer:

- 1) Samverkan och dialog mellan berörda parter genom nyetableringens alla faser, enligt SSMFS 2021:4, när det gäller kraftförsörjning från yttre nät.
- 2) Uppföljning av *specifika* prestandakrav och krav på verifiering enligt europeiska och nationella regelverk.
- 3) Uppföljning av *generella* krav avseende vållande av sak- eller förmögenhetsskada, t ex orsakad av en driftstörning, enligt elsäkerhetslagen.
- 4) Uppföljning av analyser och verifieringar enligt föreliggande rapport.

De viktigaste rekommendationerna är att tidigt etablera samverkan och dialog med berörd systemansvarig, som i sin tur hanterar företrädare för nyetableringen, att förhållandena före anslutningen av den tillkommande produktionen dokumenteras, t ex registrering av elkvaliteten i de olika nätanslutningspunkterna, och att efterlevnad av regelverkskraven på verifiering av kritiska prestandaegenskaper för den tillkommande produktionen säkerställs.



## FÖRORD

Föreliggande rapport har tagits fram av DNV på uppdrag av Energiföretagen Sverige och de svenska kärnkraftverken i Ringhals, Forsmark och Oskarshamn. Syfte och uppdragsbeskrivning har utarbetats av beställaren och arbetet har skett i nära dialog med beställaren. Från Energiföretagen har Carl Berglöf varit sammanhållande och från kärnkraftverken har Per Lamell (Forsmarks Kraftgrupp AB), Sofia Johansson och Magnus Knutsson (Ringhals AB), samt Rikard Nilsson (OKG AB) och Håkan Svahn (Uniper) deltagit i arbetet.

Syftet med rapporten är att så långt möjligt säkerställa att befintlig kärnkraftsproduktion och tillkommande omriktaranslutna anläggningar för förnybar elproduktion kan samverka över tid på ett driftsäkert sätt. I rapporten beskrivs därför relativt detaljerat de *analyser, beräkningar, modelleringar, simuleringar* och *verifieringar* som måste utföras, för att säkerställa driftsäkerheten i det nationella elsystemet och produktionsmiljön för befintliga anläggningar i samband med nyetablering av elproduktion.

## Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING .....	II
FÖRORD III	
1 BAKGRUND OCH FÖRUTSÄTTNINGAR.....	1
1.1 Uppdragets omfattning och förväntat resultat	2
1.2 Avgränsningar	2
1.3 Motivering	2
1.4 Genomförande av uppdraget	4
2 PLANERAD NÄRLIGGANDE PRODUKTIONSUTBYGGNAD .....	5
3 ANSLUTNINGSFORMER – ERFARENHETER - VAD KAN HÄNDA?.....	8
3.1 Anslutning av befintlig kärnkraft	8
3.2 Anslutningsformer för tillkommande produktion	8
3.3 Omriktare och dess reglersystem	10
3.4 Kritiska förhållanden i anslutningspunkterna för befintliga kärnkraftverk	11
3.5 Vad kan hända?	13
3.6 Erfarenheter hittills och internationell utblick	16
4 STUDIER OCH ANALYSER SOM SKA GENOMFÖRAS .....	22
4.1 Förenklad beskrivning av analysmodellen	22
4.2 Analysförutsättningar	22
4.3 Nätillgänglighet	24
4.4 Elkvalitet	25
4.5 Plötslig händelse i kraftsystemet	25
4.6 Plötslig händelse i tillkommande produktionsanläggning	26
4.7 Resonans och dämpning	26
4.8 Stabilitet och feltolerans inom tillkommande anläggning	26
5 KRAV PÅ ANALYSVERKTYG OCH MODELLERING .....	27
5.1 Analysverktyg	27
5.2 Modeller	28
6 REGELVERK .....	30
6.1 EU-förordningar och EU-direktiv	30
6.2 Svenska lagar	32
6.3 Svenska förordningar	33
6.4 Föreskrifter	33
6.5 Elnätsföretagens anslutningsvillkor, riktlinjer och allmänna råd	34
6.6 Branschdokument	35
6.7 Standarder	35
6.8 Rapporter och övriga vägledande dokument	36
7 REKOMMENDATIONER.....	40
REFERENSER .....	41



## 1 BAKGRUND OCH FÖRUTSÄTTNINGAR

Stora förändringar i kraftsystemet pågår och förväntas fortsätta under överskådlig tid för att möjliggöra fortsatt elektrifiering av industri och samhälle och därmed uppnå satta klimatmål. Därför pågår och planeras en omfattande utbyggnad av kraftsystemets produktionskapacitet. Olika typer av nya produktionsanläggningar måste anslutas till nätet på ett sådant sätt att kraftsystemets driftsäkerhet upprätthålls och att befintliga anläggningar inte påverkas negativt. Den pågående förskjutningen mot alltmer omriktaransluten elproduktion innebär att såväl kortslutningseffekten som rotationsenergin i det synkrona nordiska elsystemet sjunker och det blir av yttersta vikt för systemansvariga myndigheter att säkerställa nöjaktiga driftbetingelser, dels för det nationella elsystemet som sådant, dels för befintliga anläggningar. Eftersom livslängden på elkrafttekniskutrustning är lång, kanske 40 till 80 år, och ledtiderna för t ex kompenseringsanläggningar, synkronkompensatorer och nya ledningar är långa, så är det viktigt att säkerställningen av driftbetingelserna i det nationella elsystemet blir beständig över tid.

De svenska kärnkraftverken och dess huvudkomponenter, såsom generatorer, hjälpkraftsystem och säkerhetssystem, är designade för anslutning till det elkraftsystem vi har idag, t ex vad gäller krav på rotationsenergi (tröghet) och kortslutningseffekt, för start, stopp, normal drift, onormal drift, feltillstånd, mm. Det blir därför viktigt för fortsatt säker drift av befintliga kärnkraftverk att egenskaper i anslutande system, som är väsentliga för drift eller säkerhet, inte försämras bortom vissa gränser.

Energiföretagen har därför, tillsammans med de svenska kärnkraftverken, dvs R3 och R4 i Ringhals, F1, F2, och F3 i Forsmark samt O3 i Oskarshamn, identifierat ett behov av att ta fram en rapport som beskriver vilka *analyser, beräkningar, modelleringar, simuleringar* och *verifieringar* som måste utföras, för att säkerställa driftsäkerheten i det nationella elsystemet och produktionsmiljön för befintliga svenska kärnkraftverk. Händelser och förhållanden som kan medföra störningar i driften, leda till skada på befintlig anläggning eller försvåra befintlig anläggnings förmåga att uppfylla respektive kravbild och/eller lönsamhet behöver identifieras och motverkas.

Inom kärnkraftverken jobbar man med djupförsvaret gentemot störningar av olika slag, såväl störningar inom anläggningen som utifrån kommande störningar; djupförsvarets två första nivåer beskrivs i Tabell 1 [12]. Djupförsvaret fungerar så att om försvaret på en nivå misslyckas av någon anledning så ska försvaret på nästa nivå träda in och "fånga upp" händelsen. Målet är att hålla det på så låg nivå som möjligt och att störningar från yttre nät hålls på nivå 1, och inte överstiger nivå 2. Nätföretag som ansluter till anläggningsdelar inom kärnkraftverk, såsom huvudgenerator, starttransformator och hjälpkraftsystem, gör stora ansträngningar för att upprätthålla en god driftsäkerhet. Det är därför rimligt att tillkommande anläggningar inte försämrar driftförhållandena i det anslutande nätet eller för befintliga anläggningar.

DNV har därför, på uppdrag av Energiföretagen och de svenska kärnkraftverken tagit fram föreliggande rapport.

**Tabell 1: Kärnkraftverkens djupförsvars två första nivåer [12]**

Nivå	Syfte	Huvudsakliga medel
1	Förebyggande av driftstörningar och fel	Robust konstruktion och höga krav på utförande, drift och underhåll
2	Kontroll över driftstörningar och detektering av fel	Regler- och skyddssystem samt övervakning och tillståndskontroll

Den första och andra nivån innebär att reaktor ska konstrueras och drivas för maximal säkerhet vid normal drift. Konstruktionskrav avseende att komponenter ska kunna provas, underhållas och ersättas ska uppfyllas. För att uppfylla dessa konstruktionskrav är det viktigt att fånga upp om nya produktionskällor medför nya förhållanden eller beteende på elnätet som de befintliga kärnkraftsanläggningarna inte är konstruerade för.

## 1.1 Uppdragets omfattning och förväntat resultat

Uppdraget går ut på att, utreda och sammanställa vilka *analyser, beräkningar, modelleringar, simuleringar* och *verifieringar* som behöver genomföras innan en ny produktionsanläggning, i närheten av ett befintligt kärnkraftverk, kan beviljas anslutningstillstånd av berörd nätägare. Arbetshypotesen är att resultaten av analyser, beräkningar, modelleringar, simuleringar och verifieringar ska granskas av berörda intressenter i närheten av den tillkommande anslutningen, varefter förutsättningar för ny produktion kan fastläggas. Uppdraget omfattar, avseende "närhet", såväl stamnätsanslutningen av respektive kärnkraftverk som startnät på 70 kV respektive 130 kV nivå.

Utifrån resultaten från sammanställningen av analysbehovet enligt ovan görs en genomgång av relevanta regelverk, såsom svensk lag (t ex Ellagen 1997:857 [1] och Elsäkerhetslagen 2016:732 [2]), Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter, t ex SSMFS 2021:4, 5, och 6 [23], [24], [25], SvKFS 2005:2 [26], RfG [8] och EIFS 2018:2 [9] samt *Vägledning för anslutning till Stamnätet* (utgiven av Svenska kraftnät) [11], för att finna stöd och arbetsprocesser för genomförandet av de åtgärder som föreslås inom föreliggande uppdrag.

Uppdraget fokuserar på påverkan på närliggande anläggningar vid nyanslutning av omriktaransluten produktion. Resultaten av föreliggande uppdrag är tänkta att användas för att verifiera att ingen negativ påverkan på befintliga anläggningar kan befaras till följd av tillkommande omriktaransluten elproduktion i närområdet. Skulle sådan negativ inverkan befaras rekommenderas eliminerande åtgärder intill dess att analysen i enlighet med anvisningar och beskrivningar i föreliggande rapport visar att påverkan nått acceptabla nivåer. Det kan även tänkas att tillkommande omriktaransluten produktion förbättrar förhållandena för befintliga anläggningar, t ex med kompletterande spänningsreglering.

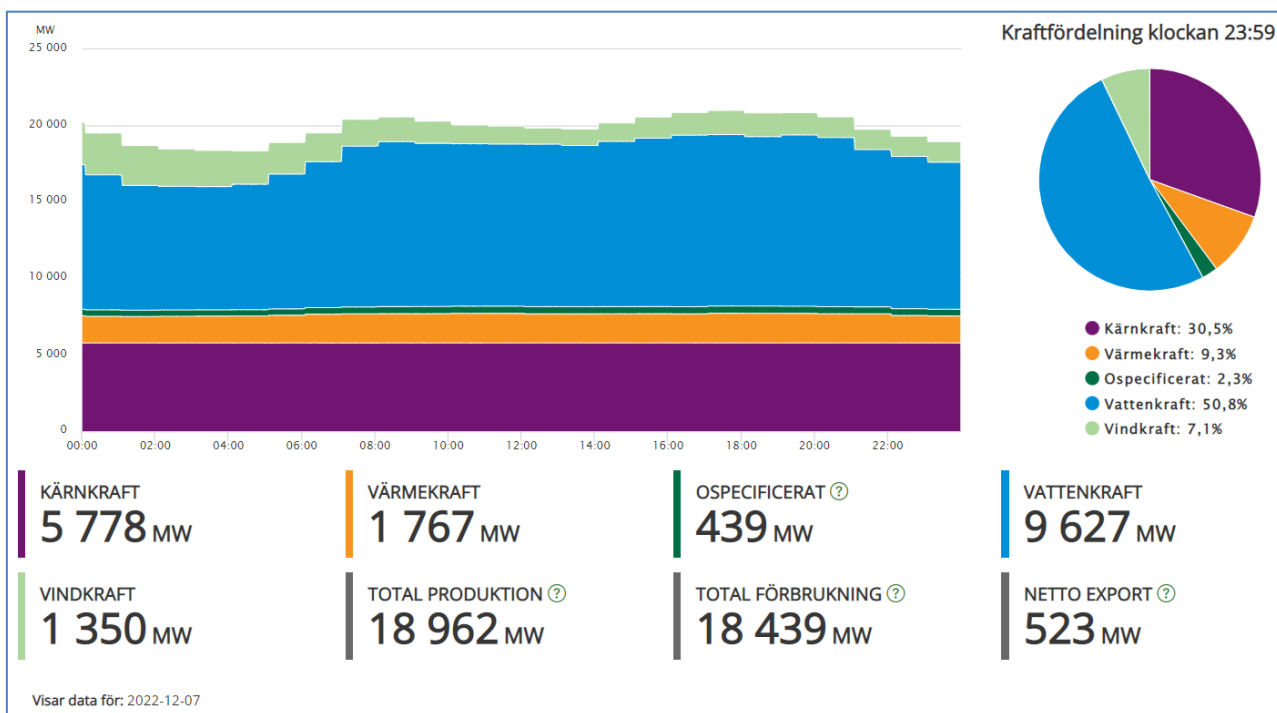
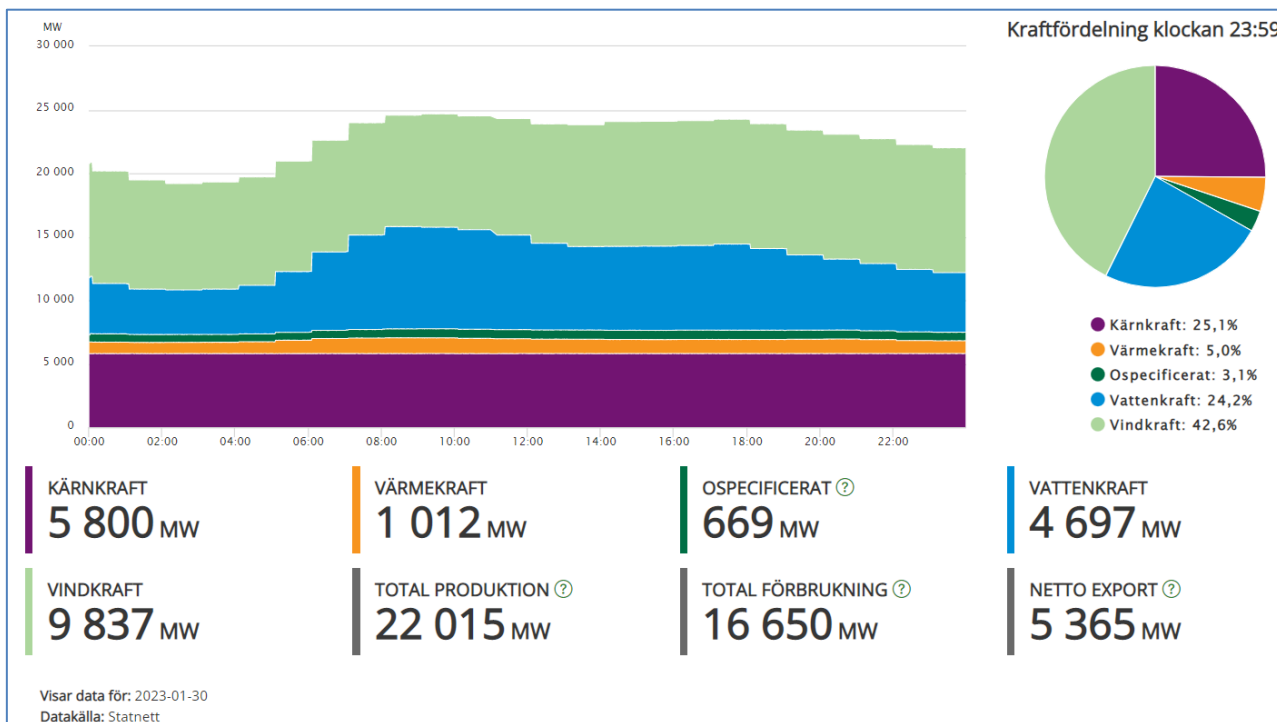
## 1.2 Avgränsningar

Uppdraget har fokus på anslutning av elproduktion *nära* befintliga kärnkraftverk. Med *nära* menas här att den tillkommande produktionsenheten har eller kan ha en signifikant påverkan på förhållandena i det närliggande kärnkraftverkets anslutningspunkt. Uppdraget omfattar därför inte rena systemaspekter till följd av produktionsförskjutning från traditionella synkronmaskiner till omriktaransluten produktion. Sådana aspekter är till exempel minskad rotationsenergi och minskad kortslutningseffekt generellt i systemet. Varken rotationsenergin i systemet eller kortslutningseffekten nära ett kärnkraftverk, som sådana, minskar av en nyanslutning av omriktaransluten produktion nära kärnkraftverket. Däremot kan kortslutningseffekten, i kärnkraftverkets anslutningspunkt, påverkas under byggtid, ändringar i anslutande nät, felfall, mm, som beror av den tillkommande produktionen. Kortslutningseffekten i anslutningspunkten kan även minska till följd av nedreglering av annan närliggande synkron produktion till förmån för den tillkommande omriktaranslutna produktionen.

## 1.3 Motivering

Svensk kärnkraft står för en betydande del av elproduktionen i Sverige och är helt oundgänglig för det svenska elsystemets driftsäkerhet och stabilitet. Av många goda skäl ser vi nu en förskjutning av nyetablering av elproduktionsanläggningar från traditionella synkronmaskinsanläggningar till anläggningar för förnyelsebar elproduktion anslutna till elsystemet via kraftelektroniska omriktare. För att inte äventyra driftsäkerheten, i det korta perspektivet, eller elenergiförsörjningen, i det längre perspektivet, är det av yttersta vikt att tillkommande omriktaransluten elproduktion inte negativt påverkar befintliga kärnkraftanläggningar. Figur 1 visar produktionsfördelningen i Sverige vid två olika tillfällen.





**Figur 1: Produktionsfördelningen i Sverige, kopierad från Svenska kraftnäts hemsida<sup>1</sup>. Överst en relativt blåsig dag i januari och underst en mer vindstilla dag i december.**

Ur Figur 1 framgår tydligt att kärnkraften står för en väsentlig del av vår nationella elförsörjning, medan vindkraften bidrar till en icke oväsentlig export.

<sup>1</sup> [Kontrollrummet | Svenska kraftnät \(svk.se\)](https://www.svk.se/kontrollrummet)



## 1.4 Genomförande av uppdraget

Uppdraget har genomförts i nära samarbete med Energiföretagen och de befintliga svenska kärnkraftverken.

Uppdraget har genomförts i följande steg:

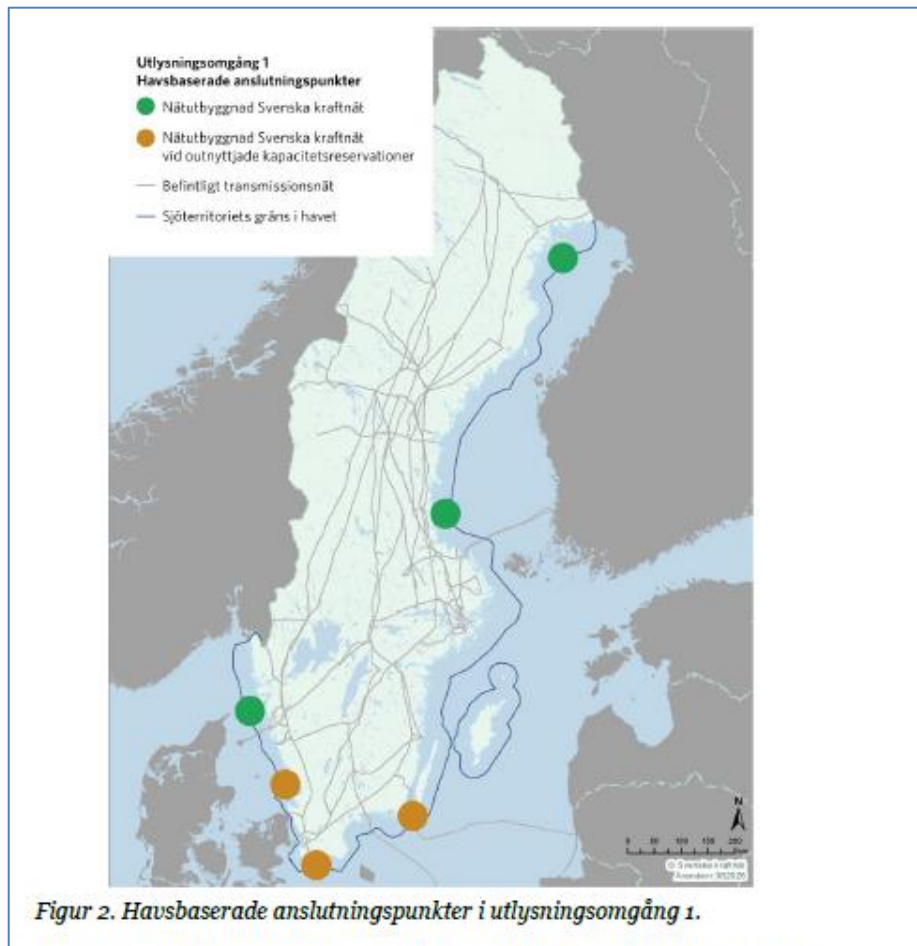
- 1) Utredning och sammanställning av vilka *analyser, beräkningar, modelleringar, simuleringar* och *verifieringar* som erfordras för att säkerställa att befintliga kärnkraftverks produktionsmiljö, kravuppfyllnad eller lönsamhet ej påverkas negativt vid nyetableringar av närliggande omriktaransluten elproduktion.
- 2) Identifiering av eventuellt övriga observationer och risker med påverkan på produktionsmiljö, kravuppfyllnad eller lönsamhet för befintliga kärnkraftverk.
- 3) Identifiering och genomgång av relevanta regelverk, branschdokument och standarder.
- 4) Jämförelse mellan regelverkskrav och analysbehov enligt 1) samt identifiering av eventuella gap.
- 5) Sammanställning och dokumentation.

Resultaten av uppdraget har sammanställts i föreliggande rapport på svenska med ett engelskt *Executive Summary*, samt i en PowerPoint-presentation, som presenterats för beställarna.

Uppdraget har genomförts under januari, februari och mars 2023.

## 2 PLANERAD NÄRLIGGANDE PRODUKTIONSUTBYGGNAD

Det är rimligt att anta att omriktaransluten produktion i närheten av befintliga kärnkraftverk kommer att anslutas till befintligt eller utbyggt stamnät eller regionnät. Svenska kraftnät har på uppdrag av regeringen förberett för utbyggnad av transmissionsnätet till områden inom Sveriges sjöterritorium [3], se Figur 2. Punkterna "Halland" och "Göteborg" ligger nära Ringhals, punkten "Sydöstra Östersjön" ligger nära Oskarshamn och punkten "Södra Bottenhavet" ligger nära Forsmark. Efter regeringsskiftet hösten 2022 har utbyggnadsplanerna ifrågasatts från politiskt håll och Svenska kraftnät efterfrågar i skrivande stund tydlighet från regeringens sida<sup>2</sup>.



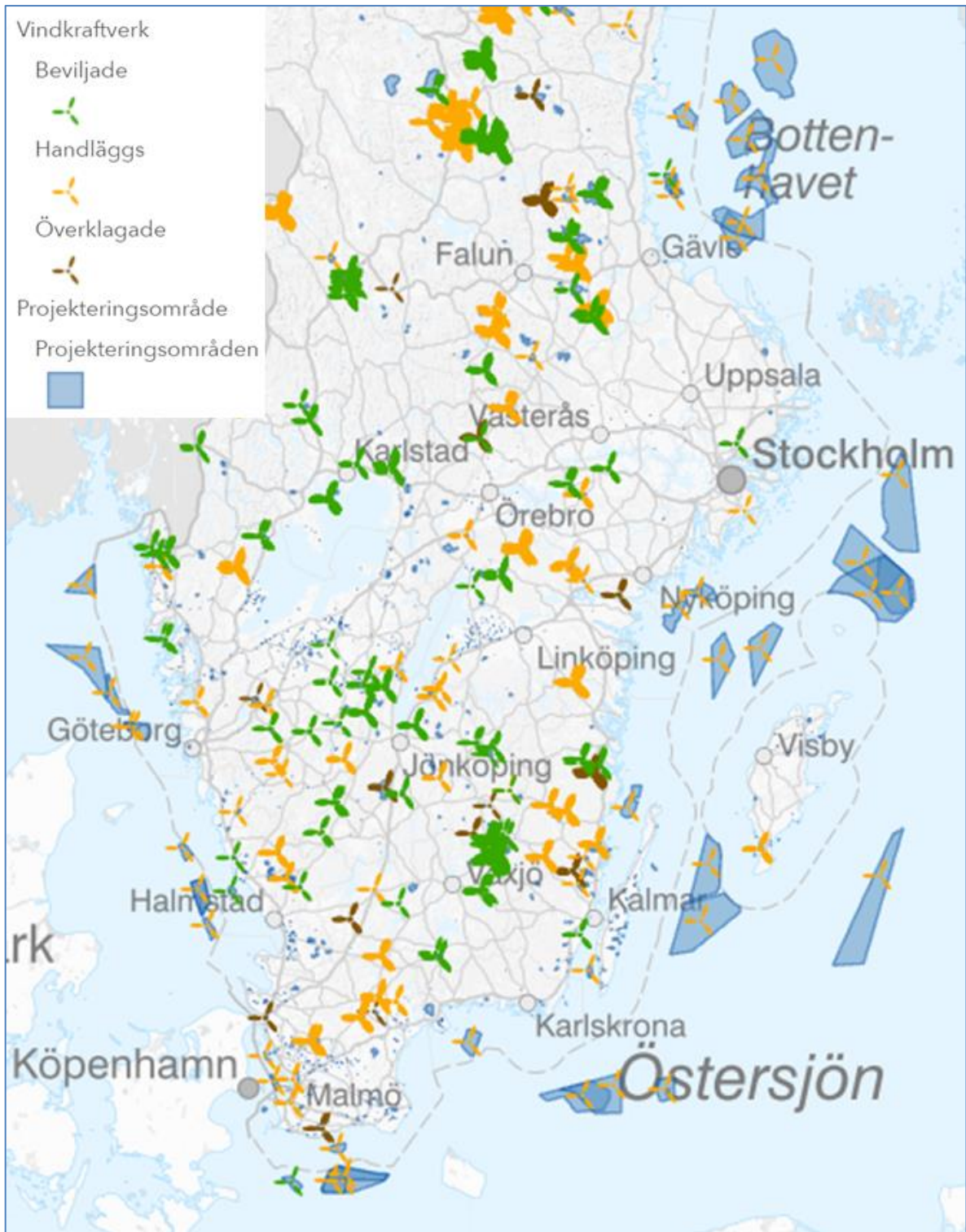
Tabell 1. Sammanfattning av den första utlysningssomgången av havsbaserade anslutningspunkter.

Prioritering	Havsbaserad anslutningspunkt	Typ	Överföringskapacitet (MW)	Preliminär tidpunkt (år)
		U = avsiktsförklaring nätutbyggnad UR = nätutbyggnad sker om nuvarande kapacitetsreservationer för anslutning på land inte utnyttjas		
1	Skåne	UR	1 400 – 2 000 MW	2029-2032
2	Halland	UR	1 400 – 2 000 MW	2029-2032
3	Sydöstra Östersjön	UR	1 400 – 2 000 MW	2029-2032
4	Göteborg	U	Minst 1 200 MW	2032
5	Södra Bottenhavet	U	Minst 1 400 MW	2033
6	Bottenviken	U	Minst 1 400 MW	2035
Totalt			8 200 – 10 000 MW	

Figur 2: Svenska kraftnäts planerade havsbaserade anslutningspunkter i utlysningssomgång 1 [3]

<sup>2</sup> SvK kräver tydlighet från regeringen om stamnät till havs | Montel ([montelnews.com](https://montelnews.com))

En god översikt av den vindkraft som planeras i södra Sverige och till havs runt kusten kan man få från [4]; en nulägesbild visas i Figur 3.



Figur 3: Planerad vindkraft, notera att befintlig vindkraft inte finns med i bilden [4]<sup>3</sup>

Det nuvarande svenska stamnätet, med närhet till befintliga kärnkraftverk, visas i Figur 4 [5].

<sup>3</sup> På Vindbrukskollens hemsida (följ länken i referenslistan) finns mer information om respektive anläggning



Tolkningen av vad som menas med ny omriktarmatad elproduktion "nära" befintligt svenskt kärnkraftverk, avser i föreliggande rapport "elektrisk närhet" med signifikant påverkan på förhållandena i det närliggande kärnkraftverket. Beroende på nätets kortslutningseffekt och grad av maskning, kan "närhet" bli flera stationer bort från respektive kärnkraftverks anslutningspunkt.



Figur 4: Nuvarande svenska stamnätet i södra Sverige [5]

### 3 ANSLUTNINGSFORMER – ERFARENHETER - VAD KAN HÄNDA?

Uppdraget gäller enbart omriktaransluten elproduktion, dvs all vind- och solkraft. Såväl stora havsbaserade anläggningar i gigawatt-klassen som mindre landbaserade anläggningar anslutna till regionnäten "nära" kärnkraftverkens startnät omfattas av det kartlagda analysbehovet.

#### 3.1 Anslutning av befintlig kärnkraft

För kopplingen mot stamnät och regionnät för respektive kärnkraftverk är det *anslutningspunkterna* till stamnätet respektive till regionnätet, och dess egenskaper, som är av primärt intresse. Egenskaperna i anslutningspunkterna beror i sin tur på hur nätet och det övriga systemet ser ut bortom anslutningspunkten. Efter stängningen av Ringhals 1 och Ringhals 2 har ombyggnader och omkopplingar gjorts. De båda halvorna i Ringhals 3 är normalt sammankopplade på 400 kV nivå i Ringhals och ansluter till de båda 400 kV ställverkssektionerna i Strömman. De båda halvorna i Ringhals 4 är normalt kopplade till separata 400 kV skenor i Ringhals och ansluter till var sin ställverkssektion i 400 kV stationen i Horred. Oskarhamn 3 är ansluten till 400 kV ställverket i Ekhyddan, med fyra utgående 400 kV ledningar och ytterligare en ledning planeras. Forsmark 1 och Forsmark 2 är anslutna till var sin ställverkssektion i det ena ställverket i Forsmark och Forsmark 3 är ansluten till det andra ställverket i Forsmark. Startnäten är i samtliga fall anslutna till regionnäten vilka sammankopplas med stamnätet via systemtransformatorer. Startnäten används inte enbart vid uppstart av kärnkraftverken.

#### 3.2 Anslutningsformer för tillkommande produktion

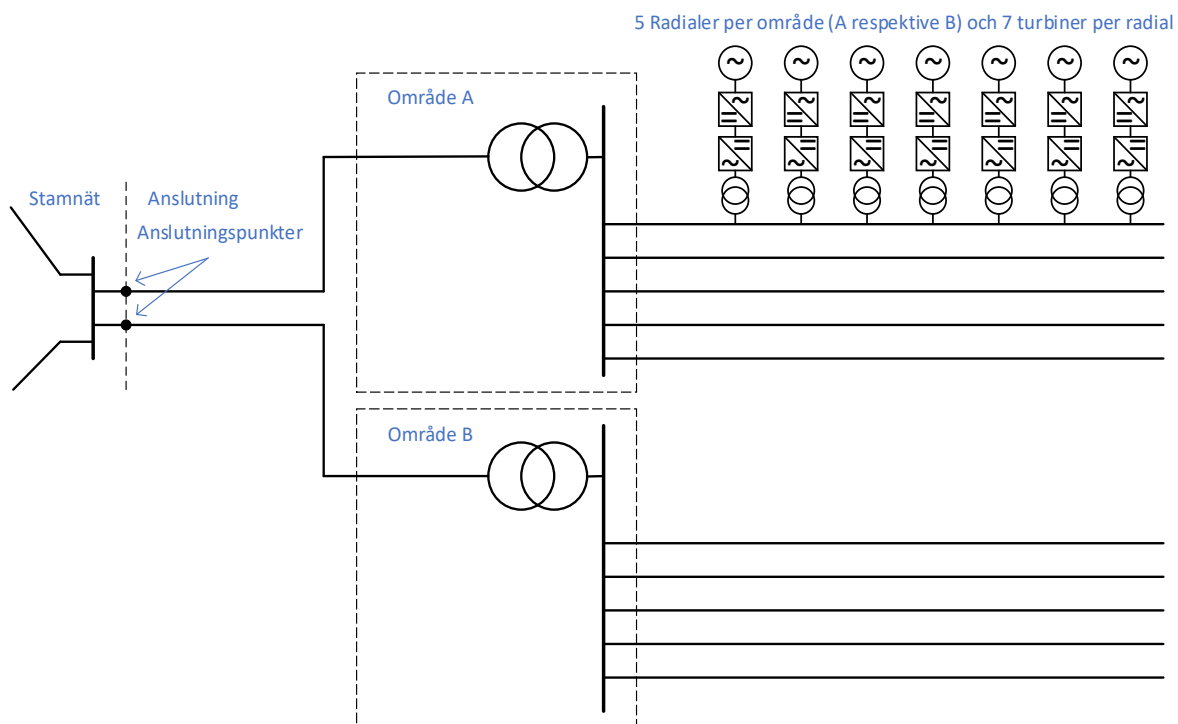
Anslutningsformerna för tillkommande produktion kan i huvudsak härledas till följande fyra typer:

- Landbaserad anläggning med uppsamlingsnät och upptransformering direkt till 400 kV i närheten av ett befintligt kärnkraftverk, se Figur 5.
- Havsbaserad anläggning med havsbaserat uppsamlingsnät och landanslutning via HVDC, som landar nära ett befintligt kärnkraftverk, se Figur 6.
- Havsbaserad anläggning med havsbaserat uppsamlingsnät och landanslutning via HVAC, som landar nära ett befintligt kärnkraftverk, se Figur 7.
- Landbaserad anläggning med uppsamlingsnät och upptransformering till 70 eller 130 kV i närheten av ett befintligt kärnkraftverk, se Figur 8.

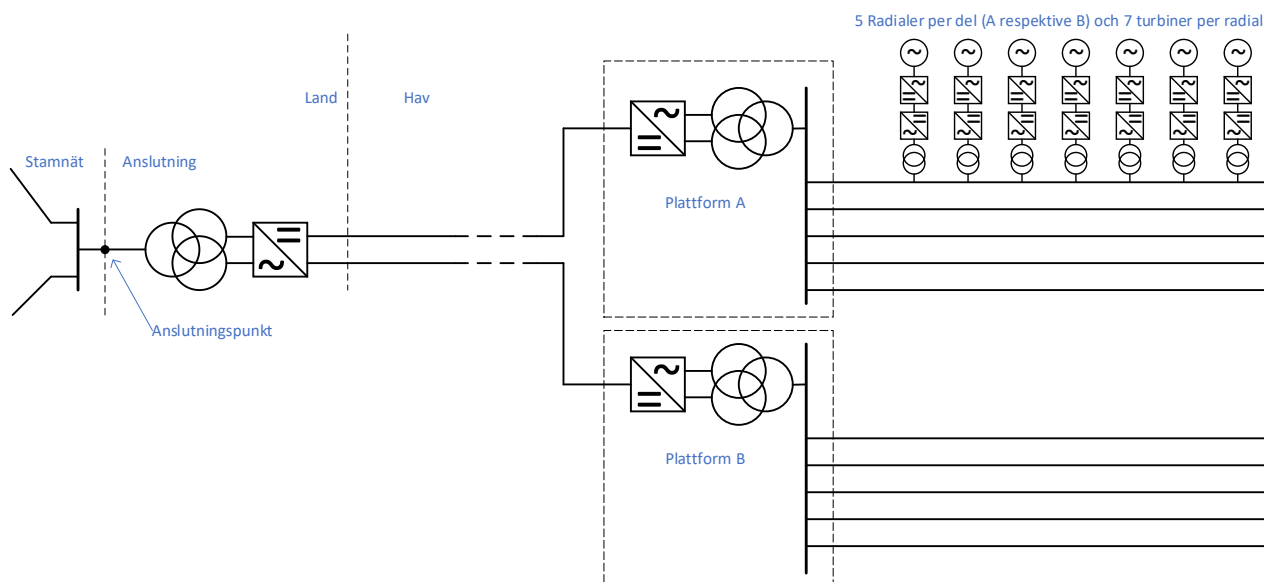
Anslutning av tillkommande produktion kan t ex ske till samlingskena i närliggande ställverk, i förhållande till befintligt kärnkraftverk. Närmare än så kan nätanslutning knappast befaras, dvs anslutning till samma skena som befintlig kärnkraft betraktas som orealistiskt, t ex av tillgänglighetsskäl eller pga enkelfelskriteriet.

För regionnäten kan anslutning ske antingen via en dedikerad produktionsradial till ett lämpligt ställverk, eller som ett påstick, alternativt en ny fullständig station på en uppklippt ledning.

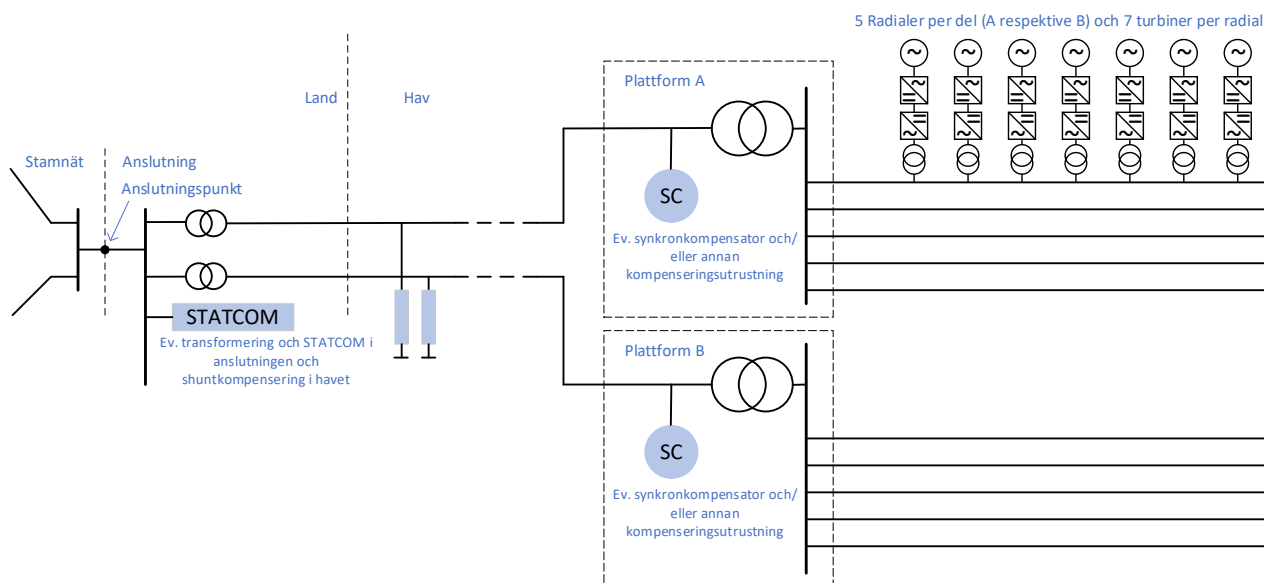
Det finns en uppenbar risk att havsbaserade anläggningar allt längre ut till havs av ekonomiska skäl önskar ansluta till stamnätet (eller möjligen till regionnätet) via HVAC, till exempel Kriegers Flak och Sydkustens Vind, men även andra och större anläggningar. Hornsea kan betraktas som en "föregångare" på område med HVAC-anslutning av vindkraft c:a 100 km ut i havet.



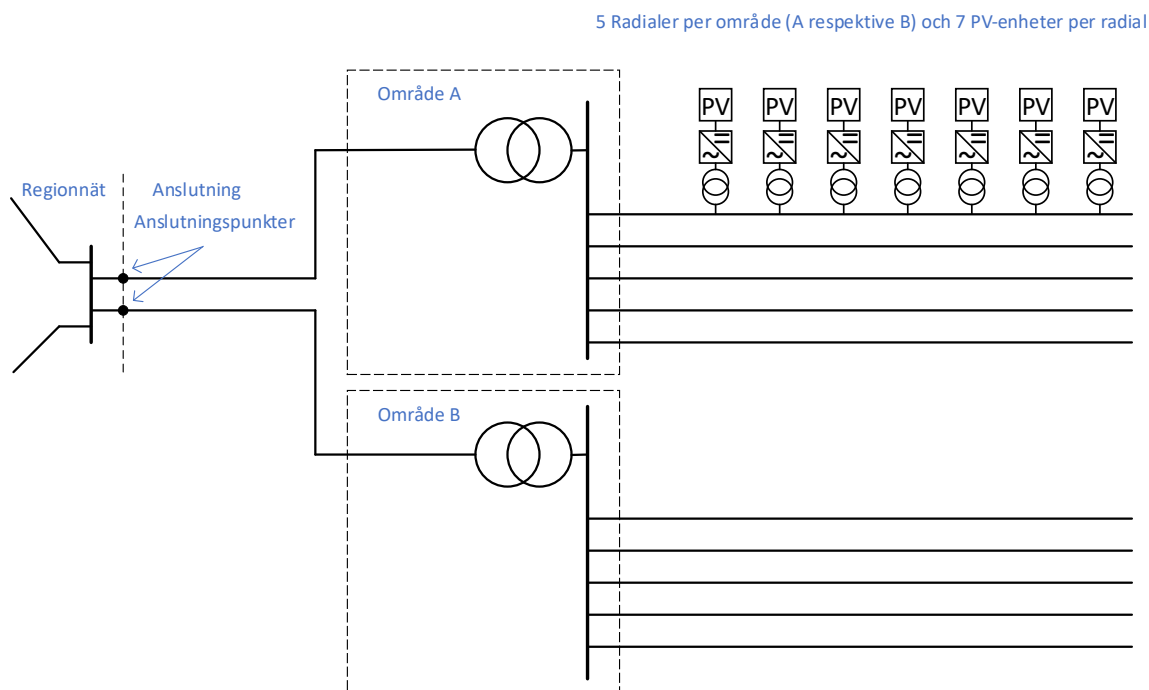
Figur 5: Typexempel på större landbaserad anläggning för förnyelsebar elproduktion, med två områden på vardera 700 MW (20 MW per turbin) innehållande radiellt uppsamlingsnät, upptransformering och en anslutningsledning per område till stamnätet.



Figur 6: Typexempel på större havsbaserad anläggning för förnyelsebar elproduktion, med två plattformar om vardera 700 MW (20 MW per turbin) innehållande radiellt uppsamlingsnät, upptransformering och likriktning på plattform, HVDC-överföring till land, växelriktning, transformering och anslutning till stamnätet.



Figur 7: Typexempel på större havsbaserad anläggning för förnyelsebar elproduktion, med två plattformar om vardera 700 MW (20 MW per turbin) innehållande radiellt uppsamlingsnät, upptransformering och HVAC-överföring till land, transformering och anslutning till stamnätet. HVAC-överföringen kräver troligen omfattande kringutrustning för bl a spänningshållning och pendlingsdämpning.



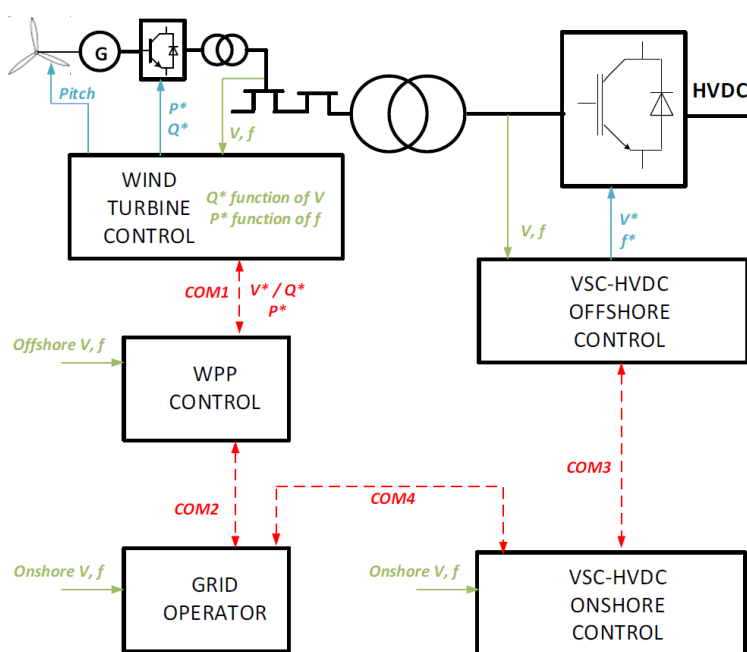
Figur 8: Typexempel på mindre landbaserad anläggning för förnyelsebar elproduktion, med två uppsamlingsområden om vardera 70 MW (2 MW per PV-enhet) innehållande radiellt uppsamlingsnät, upptransformering och anslutningsledning fram till regionnätet.

### 3.3 Omriktare och dess regelsystem

All solkraft och all vindkraft är idag ansluten till kraftsystemet via en eller flera kraftelektroniska omriktare. I det enklaste fallet omvandlas likspänningen från solceller till växelspanning, i ett steg, varefter växelspanningen transformeras upp till lämpliga nivåer och ansluts till nätet. I större havsbaserade vindkraftparker är det vanligt att elen genereras som



växelström med en varierande frekvens. Elen likriktas därefter i en fulleffektomriktare, som även innehåller en växelriktare som ger ut en 50 Hz spänning på ett uppsamlingsnät för många vindturbiner. Sedan följer upptransformering till transmissionsnätets nivå och likriktning ute till havs. En HVDC-förbindelse för därefter elen till land där växelriktning och anslutning till transmissionsnätet sker. Landbaserade och landnära vindkraftparker kan ansluta utan HVDC-förbindelse direkt till region- eller stamnät. Vindkraftturbinernas omriktare är oftast av VSC<sup>4</sup>-typ, medan HVDC-överföringar kan vara antingen så kallade classic<sup>5</sup> eller VSC. Classic, eller LCC, används ofta för HVDC-länkar mellan olika kraftsystem, men hittills inte för att ansluta vindkraft, eftersom omriktaranläggningarna kräver ganska hög kortslutningseffekt i anslutande växelströmssystem. För välfungerande, robusta och funktionella, omriktarsystem erfordras avancerade regler- och styrsystem i en hierarkisk uppbyggnad. Komplexa system med många parametrar innebär alltid risker för fel, oförutsedda händelser, felbetjäning, etc. Figur 9 visar ett exempel på komplexiteten i samverkande reglersystem för havsbaserad vindkraft [10].



Figur 9: Reglersystem för havsansluten vindkraftproduktion [10]

### 3.4 Kritiska förhållanden i anslutningspunkterna för befintliga kärnkraftverk

Befintliga kärnkraftverk är beroende av de elektriska förhållandena i anslutningspunkterna, såväl

- de statiska förhållandena som är direkt mätbara, t ex spänningens amplitud, fasvinkel, och frekvens samt elkvalitetsparametrar, som
- de dynamiska förhållandena, som visar sig i samband med excitering<sup>6</sup>, t ex kortslutningseffekt och dämpning.

Beroendet gäller såväl förhållandena för huvudgeneratoren som för hjälpkraftsystemen.

En annan viktig parameter är risken för inmatningsbegränsning i kärnkraftverkets anslutningspunkt, som på ett eller annat sätt orsakas av den tillkommande produktionen och stamnätets kapacitet.

Efter Forsmarkstörningen den 25 juli 2006 [6] gjordes omfattande arbeten för att säkerställa att våra svenska kärnkraftverk är robusta mot samtliga då förekommande onormaliteter i spänningsmatningen av hjälpkraftsystemen.

<sup>4</sup> Voltage Source Converter; omvandlare av transistor-typ som både kan tända och släcka ventilen

<sup>5</sup> Omvandlare av tyristor-typ (LCC – Line-commutated Current-sourced Converter) som endast kan tända ventilen

<sup>6</sup> Eftersom dynamiska egenskaper inte låter sig bestämmas i stationärtillstånd, så måste någon form av förändring (excitering), koppling eller kortslutning, till för att kunna beskriva de dynamiska egenskaperna.

Fram till den 25 juli 2006 hade mycket arbete lagts på att säkerställa pålitlig övergång till intern spänningsmatning vid (totalt!) bortfall av yttre nät, medan lite kraft lagts på att hantera situationer då yttre nät fanns kvar men med onormala egenskaper, t ex låg spänning. Arbetet som gick under namnet "Robusta elsystem" fick stor internationell uppmärksamhet [7]. I samband med störningen den 25 juli 2006 blev man uppmärksam på att eventuella ofullkomligheter i yttre nät, såsom fasbortfall, slår rakt in på alla delar av hjälpkraftsystemen. Även efter haveriet i Fukushima gjordes omfattande arbeten för att framgent säkerställa robustheten vid de svenska kärnkraftverken, t ex infördes krav på så kallad "oberoende härdkylning". Arbetena efter haveriet i Fukushima refereras ofta som ROBELSYS (ROBustness of ELectrical SYStems) [27], [28].

Nu står vi inför en liknande analysituation, som 2006, när det gäller att identifiera nya onormala driftförhållanden i kärnkraftverkens anslutningspunkter orsakade av närliggande omriktaransluten produktion.

Med "förhållandena i anslutningspunkten" menas alla de egenskaper som det anslutande kraftsystemet uppvisar i anslutningspunkterna för det befintliga kärnkraftverket, varav vissa är direkt mätbara, såsom spänningens amplitud och frekvens, medan andra visar sig i samband med exciterande händelser, såsom kortslutningseffekt och rotationsenergi. Exempel på sådana kraftsystemegenskaper i kärnkraftverkets anslutningspunkter är:

- Mottagningskapacitet för aktiv effektinmatning från kärnkraftverket
- Spänningens nivå, dvs växelspanningens kvasistationära effektivvärde
- Spänningsregleregenskaper i bakomliggande system (visar sig vid störning)
- Spänningsändringar
  - amplitudsprång, t ex vid fel, kopplingar och börvärdesändringar
  - fasvinkelsprång, t ex vid fel eller kopplingar
- Övertoner, mellantoner, undertoner (subharmonics), supraharmonics
- Flimmer
- Osymmetri i spänningen, dvs hög andel minus- eller nollföljdsspänning
- Frekvensens nivå, dvs växelspanningens kvasistationära grundtonsfrekvens (nära 50 Hz)
- Frekvensregleregenskaper i bakomliggande system (visar sig vid störning)
- Frekvensändringar; RoCoF<sup>7</sup>, storlek, form och varaktighet på förekommande frekvensändringar
- Resonansfrekvenser, risk för subsynkron resonans, stående vågor eller systemvida effektpendlingar
- Kortslutningseffektens nivå, viktig t ex för start av stora objekt och stabilitet
- Ändring av kortslutningseffekten, t ex nätförsvagning i samband med fel eller underhåll, kan leda till urfasfall
- Rotationsenergi i anslutande system, viktig för systemstabiliteten
- Dämpningsegenskaper, såsom R/X förhållande, och andra dämpfunktioner, t ex PSS<sup>8</sup>

Föreliggande uppdrag syftar till att beskriva de analyser som erfordras för att beskriva hur omriktaransluten produktion påverkar, eller kan påverka, förhållandena i anslutningspunkten för ett närliggande kärnkraftverk.

<sup>7</sup> RoCoF: Rate of Change of Frequency, dvs frekvensens tidsderivata

<sup>8</sup> PSS: Power System Stabilizer, en tillsats till spänningsregleringen avsedd att dämpa pendlingar

### 3.5 Vad kan hända?

Efterhand som elektriciteten etablerat sig som en oundgänglig samhällsresurs har även kvalitetskraven och tillgänglighetskraven på el ökat. Kraftsystemet har utvecklats genom decennierna under 1900-talet och fram till idag. Vissa delar och egenskaper är väl kända sedan tidigt, såsom kortslutningsströmmar och deras skadliga verkningar, medan andra gjort sig påmind senare, såsom spänningsstabilitet<sup>9</sup> och subsynkron resonans<sup>10</sup>. Med omriktaranslutna produktionsenheter följer även komplexa reglersystem, vars *pålitlighet* (eng. dependability, dvs att systemen gör det som förväntas) kan vara lätt att verifiera, medan reglersystemens *säkerhet* (eng. security, dvs att systemen inte gör något som inte förväntas) kan vara betydligt svårare att kontrollera. Ett oväntat beteende hos reglersystemen vid vindkraftsanläggningen Hornsea förvärrade ett korrekt bortkopplat jordfel i Englands inland till ett nationellt systemavbrott [13]. Det blir därför viktigt att samla alla tidigare erfarenheter och att vara ödmjuk inför det okända. Nedan följer en genomgång av kända fenomen som måste beaktas vid förändringar i kraftsystemet.

Statisk påverkan på spänningens egenskaper i kärnkraftverkets anslutningspunkt, dvs hur förändras förhållandena under normaldrift, start, stopp, rampning, etc., av den nytillkomna elproduktionen, med avseende på:

- Spänningsnivå / behov av reaktivt effektutbyte / reaktiva stamnätsreserver (N-1)<sup>11</sup>
- Övertoner, mellantoner, subharmoniska toner, och supratoner
- Flimmer
- Osymmetri; minusföljdsspänning, nollföljdsspänning
- Tillgängligt effektinmatningsutrymme till stamnätet för kärnkraftverket

Plötslig ändring av systemets egenskaper i kärnkraftverkets anslutningspunkt i samband med kopplingar eller felfall:

- Spänningsprång i samband med primära störningsfel eller produktionsfrånslag, och reaktion på dessa från den tillkommande elproduktionen
- Spänningsprång i kombination med frekvensavvikelse i samband med primära störningsfel eller plötsligt produktionsfrånslag, och reaktion på dessa från den tillkommande elproduktionen
- Nätförsvagning, t ex ledningsbortkoppling, som initierar pendlingar mellan befintlig kärnkraftgenerator och tillkommande anläggning, som kan vara direktkopplad till stamnätet eller ansluten via en HVAC- eller HVDC-överföring.

Ändrade förhållanden i kraftsystemet, till följd av den tillkommande produktionen, som påverkar driften i befintligt kärnkraftverk, vid såväl normala som onormala driftförhållanden i kraftsystemet, kan vara av kontinuerlig eller intermittent natur. Tänkbar påverkan från den tillkommande elproduktionen på kärnkraftverket omfattar:

- Kontinuerlig påverkan
  - Övertoner, flimmer och osymmetri
    - ger upphov till förluster (rena kostnader)
    - begränsar utnyttjandegraden av utrustning (t ex pga uppvärmning eller vibrationer)
    - förkortar livslängd på utrustning (t ex pga uppvärmning eller vibrationer)
    - kan leda till haverier på utrustning
  - Överföringsbegränsningar i nätet tvingar kärnkraftverket till reducerad effektutmatning

<sup>9</sup> T ex Hamrastörningen 1983

<sup>10</sup> T ex Mohave 1970

<sup>11</sup> Med tanke på reaktiva reserver så ska stamnätet tåla bortfall av en enhet utan att spänningen i någon punkt eller reaktivutbytet för någon annan enhet går utanför fastställda gränser, se [22], Artikel 35.

- Onormala spänningar eller spänningsvariationer i anslutningspunkten, alternativt ökat reaktivt reglerarbete i kärnkraftverket
- Monopolär drift, ibland använd som reservdriftsmöjlighet för HVDC-förbindelser, kan ha bestående påverkan på jordningssystem; kopparlinorna äts helt enkelt upp av galvaniska strömmar
- Störning av driften
  - Bortkoppling av huvudgeneratoren till följd av
    - Onormal spänning, orsakad av den närliggande produktionen  
T ex fel som inte kopplas bort korrekt
    - Onormala pendlingar, t ex subsynkron resonans eller effektpendlingar, orsakade av den närliggande produktionen  
T ex reglersystem som löper amok i samband med nättransient eller nätförsvagning
- Annan driftpåverkan än störning
  - Spänningspåverkan på stam- eller regionnät som påverkar den reaktiva produktionen i kärnkraftverket eller spänningen på hjälpkraftsystemet
  - Påverkan på den aktiva produktionen i samband med bestående nätförsvagning, t ex ledningsbortfall, som leder till flaskhalsproblematik
- Haveri på utrustning
  - Haveri på huvudturbin eller drivaxlar i hjälpkraftsystemen till följd av resonanser orsakade av ofullkomlighet i reglersystemen kopplade till den nya elproduktionen.
  - Kärnkraftverket har eget och tillräckligt skydd mot alla nu kända typer av utifrån kommande spänningstransienter.
  - Kärnkraftverket har eget och tillräckligt skydd mot alla nu kända typer av utifrån kommande termisk påverkan på komponenter inne i kärnkraftverket.
- Livslängdspåverkan på apparater och utrustning
  - Fler primära fel i anslutande nät leder till fler mekaniska påfrestningar på anslutet maskineri, som successivt förkortar återstående livslängd för mekaniska delar, såsom axlar och turbinbladsinfästningar.
  - Fler primära fel i anslutande nät och därtill kopplade felströmmar leder till termiska påfrestningar på ansluten utrustning, som successivt bryter ner isolationen och förkortar återstående livslängd på kablar och utrustning med annan isolation än luft.
  - Fler spänningstransienter, alternativt långvarig drift med hög spänning, i anslutande nät påverkar isolationen i anläggningsdelar och utrustning och bryter successivt ner isolationen och förkortar återstående livslängd på transformatorer, kablar och utrustning med annan isolation än luft.
- Säkerhetspåverkan
  - Den nukleära säkerheten i kärnkraftverken säkerställs via ett antal barriärer, redundans (fyra subsystem) och diversifiering, samt om- och bortkopplingar. Händelser i anslutande kraftsystem utmanar på olika sätt dessa barriärer. Barriärerna är uppbyggda för att med tillfredsställande säkerhet kunna hantera alla kända typer av störningar och fenomen som når anläggningen via anslutningspunkterna till yttre nät. Det är viktigt att säkerställa att kända typer av händelser som

utmanar säkerhetssystemen inte signifikant ökar i antal till följd av den tillkommande produktionsanläggningen och att, bortom allt rimligt tvivel, säkerställa att inga nya typer av händelser, som, signifikant, kan utmana säkerhetssystemen, tillkommer.

För analys av tänkbar påverkan enligt ovan ska såväl normala driftförhållanden som rimlig felfunktion inom den tillkommande anläggningen analyseras. Exempelvis antas att en enhet i felbortkopplingskedjan felfungerar eller uteblir i funktion, alternativt att ett reglersystem inte fungerar på avsett sätt.

Påverkan på befintligt kärnkraftverk av den tillkommande elproduktionen kan

- 1) Pågå *kontinuerligt* och bero på design och lösningar för den tillkommande elproduktionen, t ex övertoner, flimmer eller osymmetri
- 2) Pågå *temporärt* i samband med reducerad nätkapacitet till följd av den tillkommande anläggningen, t ex i samband med byggnation eller ändringsarbeten
- 3) Uppstå *spontant* i samband med oförutsedda händelser inom den tillkommande anläggningen och dess nätanslutning, t ex otillräcklig felbortkoppling, fördröjd felbortkoppling till följd av utebliven funktion, eller felinställda reglersystem
- 4) Uppstå betingat, till följd av respons från reglersystem eller motsvarande inom den tillkommande anläggningen och dess nätanslutning, till följd av *dimensionerande näthändelser*, såsom reservbortkoppling av trefasig kortslutning
- 5) Uppstå betingat till följd av respons från reglersystem eller motsvarande inom den tillkommande anläggningen och dess nätanslutning, till följd av *icke-dimensionerande näthändelser*, såsom bortkoppling av tvåfasig kortslutning mellan två olika samlingsckenor, jämför Horred 2003-09-23.

Tillkommande omriktaransluten produktion är känslig för fel i styr- och reglersystem och beroende av fungerande kraftelektronik. Följande typiska och kända händelser och fenomen bör analyseras eller uteslutas:

- Kommuteringsfel i HVDC-anläggningar VSC/Classic och konsekvenser för närliggande anläggningar
  - Under vilka förutsättningar uppkommer kommuteringsfel och vilka blir konsekvenserna för kraftsystemet och närliggande kärnkraftverk (transientanalyser)
- Fasvinkelhopp i spänningen (Ref: Robusta elsystem)
  - Hur robust är omriktaren mot förekommande hopp i spänningens fasvinkel i kraftsystemet?
  - Vilka direkta konsekvenser kan vanligt förekommande fasvinkelhopp i kraftsystemet, likväl som mer sällsynta, få i omriktaranläggningen och vilka indirekta konsekvenser kan uppstå i närliggande kärnkraftverk (transientanalyser)
- Effektpendlingar, aktiva eller reaktiva, till följd av felaktig reglerrespons, beroende på felaktig förstärkning, felaktig filtrering av mätvärden, felaktig logik, felaktig återkoppling, felaktiga parameterinställningar, eller liknande, som exempelvis skulle kunna leda till subharmoniska svängningar
- Kraffrekvent överspänning och hög spänningsderivata (Ref: Robusta elsystem)
  - Kan kraffrekventa överspänningar och/eller snabba spänningsökningar matas ut på anslutande nät, t ex till följd av fel i spänningsreglering?
- DC in på omriktartransformatorn – ”Kortslutning av växelriktaren” (Ref: Robusta elsystem)
  - Kan likspänningar ta sig igenom eller förbi omriktaren och spänningssätta någon fas i anslutningspunkten, jfr kortslutning från uppsidan till nedsidan i en transformator?
  - Vad händer då i anslutande växelströmssystem?

### 3.6 Erfarenheter hittills och internationell utblick

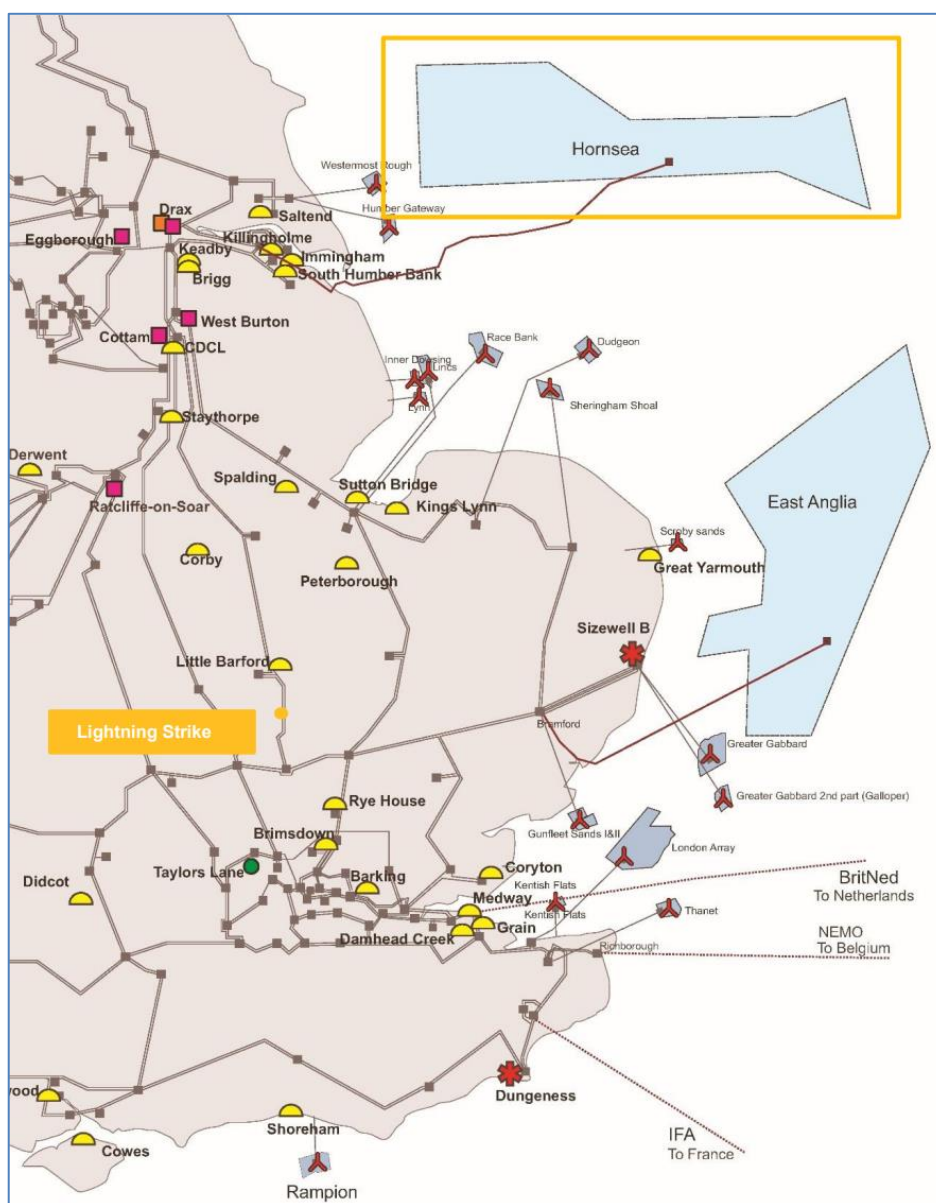
Erfarenheterna hittills från stora omriktare i växelströmssystem härrör mest från HVDC-överföringar, men även erfarenheter från omriktaranslutna produktionsanläggningar börjar komma till.

#### 3.6.1 Europa November 2006

Svårbedömd vindkraftsproduktion i norra Tyskland den 4 november 2006, tillsammans med planerat ledningsavbrott, ledde till att en ledning blev överbelastad och kopplades bort, med påföljande kaskadbortkoppling av fler ledningar. Det kontinentala europeiska systemet delades i tre delar och c:a 15 miljoner europeiska hushåll blev utan elektricitet [15].

#### 3.6.2 England Augusti 2019

Ett blixtnedslag drabbade en transmissionsledning i mellersta England den 9 augusti 2019 [13]. Felet kopplades bort korrekt av ledningsskydden i ledningens båda ändpunkter inom 100 ms [13], se Figur 10.



Figur 10 Karta över den drabbade delen av England, notera speciellt det stora avståndet mellan blixtnedslaget (gul prick) och Hornsea [13].

I England tillämpar man fördröjd återinkoppling och ledningen var åter i drift efter 20 sekunder. Driftförhållandena både före och efter störningen var normala med normala marginaler och reserver. I samband med felet så kopplades c:a 150 MW distribuerad produktion (ansluten till lägre spänningsnivåer) bort av så kallade "vector-shift"<sup>12</sup> reläer. Detta är ett känt tillkortakommande som finns med i planeringen. Dessutom bortkopplades en termisk produktion om 244 MW i Little Barford, i närheten av blixtnedslaget, och 737 MW från Hornsea, långt från blixtnedslaget. Bortfallet av (150+244+737 MW) gjorde att frekvensfallet blev större än dimensionerat och medförde att ytterligare 350 MW distribuerad produktion kopplades bort till följd av frekvensderivataskydd ämnade att skydda mot oplanerad önätsdrift. Även produktionsbortkoppling till följd av hög negativ frekvensderivata är känd och tagen höjd för. Dimensionerande produktionsbortfall var vid tillfället 1000 MW. Bortfallet av totalt 1481 MW ledde till ett frekvensfall ned till 49,1 Hz och ytterligare produktionsfrånkoppling. Vid frekvensnivån 48.8 Hz skedde automatisk förbrukningsfrånkoppling, totalt c:a 1000 MW, och frekvensen stabiliserades. Drygt en miljon kunder blev utan elektricitet under upp till en timme och c:a 60 tåg blev stående på banan.

I samband med primärfelet registrerades en spänningsdipp i anslutningspunkten för Hornsea. Reglersystemet på Hornsea registrerade felaktigt detta som en generell spänningssänkning och ökade reaktivutmatningen, som ledde till stora effektpendingar, aktiva såväl som reaktiva, när primärfelet kopplades bort. Pendingarna vara svagt dämpade och ledde till att Hornsea styrde ned produktionen från 799 MW till 62 MW, se Figur 11.



**Figur 11 Spänning och aktiv effekt (överst), samt spänning och reaktiv effekt (underst) vid Hornsea i samband med störningen den 9 augusti 2019 [13].**

<sup>12</sup> Vector shift relays: reagerar på ett plötsligt hopp i spänningsvektorns fasvinkel och var ursprungligen tänkt att koppla bort anläggningen i samband med spontan övergång till oplanerad önätsdrift.



### 3.6.3 Bortkoppling av Forsmark 3 från SSR-skyddet

I samband med arbete i Dannebo på Fennoskanledningen, den 24 januari 2005, initierades nätstörningar som triggade SSR-skyddet för Forsmark 3. Störningen var av den storleksordningen att den efter 0,4 sekunder löste ut generatorbrytaren, och lastfrånslag erhöles. Sedvanliga kontroller genomfördes efter störningen och generatoren fasades igen efter 54 minuter. Orsaken till störningen var att ett arbete i Dannebo medförde en störning i kraftledningen mot F3:s ställverk. Störningen orsakade en transient i nätet från Fenno-Skan som ledde till stora strömmar i det subsynkrona området. Störningen var av den arten att SSR-skyddet löste ut för att skydda turbinsträngen mot otillåtna påkänningar.

### 3.6.4 Turbinstörningar i Forsmark 3 vid inkoppling av Fennoskan

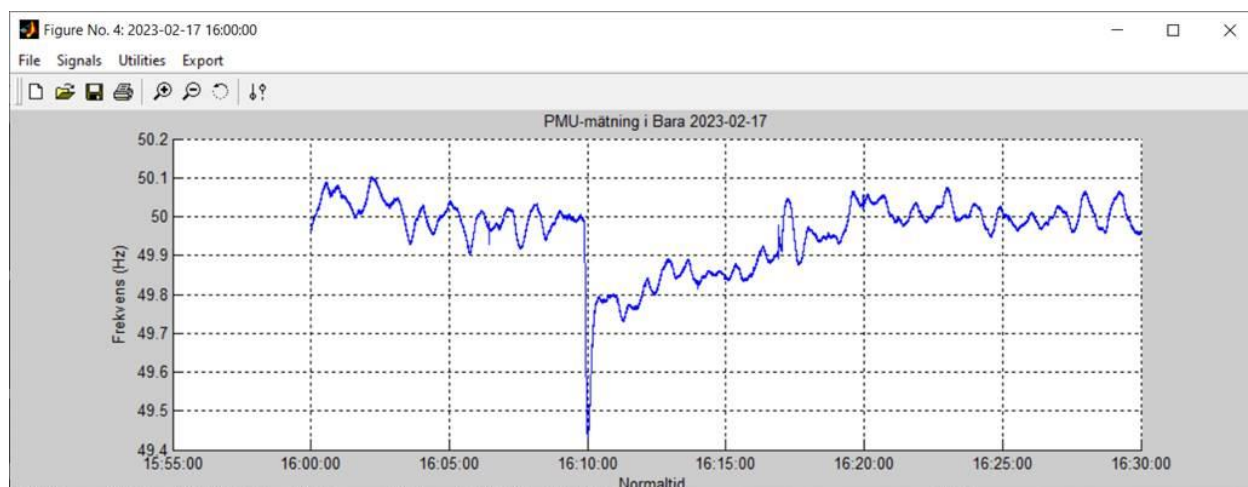
Torsdagen 4 maj 2006 tillkopplade Svenska kraftnät 400 kV ledningen mellan Forsmark och Dannebo. SSR-skyddet i Forsmark 3 detekterade då en nätstörning och larmar c:a två tiondels sekunder före erhållen signal "brytare till". Omedelbart därefter erhålls larm från de så kallade Amrein-givarna som indikerar vibrationer på över 2 mm/s. Om vibrationerna på dessa givare är över 3 mm/s ska personalen enligt instruktion lösa ut turbinen manuellt och vid vibrationer över 5 mm/s löser skyddsutrustningen ut turbinen automatiskt. Problemen för F3 blir då omfattande och kostsamma. Förutom vibrationerna kan även SSR-skyddet lösa ut generator- och fältbrytare.

Via fördjupad felsökning i Forsmarks generatorövervakningssystem var vibrationerna enligt andra mätpunkter uppe i 9 mm/s vid lagret mellan generatoren och magnetiseringsutrustningen och 7 mm/s vid lagret "utanför" magnetiseringen. Dessa givare är dock av en annan typ än Amrein och är inte kopplade till någon utlösningfunktion. Vibrationerna pågick i 10 sekunder innan de kom ner under larmgränsen 2 mm/s. Normalt driftvärde, mätt på de givare som gick upp till 7 och 9 mm/s är c.a 0,2 mm/s.

Störningen den 4 maj 2006 är att betrakta som stor och riskerna för F3:s drift och ekonomi var påtagliga. Efter störningen den 4 maj har man inte noterat några liknande händelser i Forsmark.

### 3.6.5 Icke-dimensionerande enkelfel på NordLink – En ny feltyp

Fredagen den 17 februari 2023, vid 16-tiden på eftermiddagen, ändrade NordLink plötsligt (under mindre än 1 sekund) effektriktning, från 1400 MW import till 150 MW export<sup>13</sup>. Uppgifter från Svenska kraftnät säger att effektlödet ändrades från 1375 MW import till 300 MW export. Händelsen resulterade i omfattande nödingrepp på den svenska sidan, dels aktivering av två EPC<sup>14</sup>-steg på Konti-Skan, dels genom start av gasturbinerna i Hallstavik, Lahall, Barsebäck, Karlshamn och Stallbacka; totalt 11 gasturbinstarter och 2 EPC-steg. En frekvensregistrering från en mätstation strax utanför Malmö visas i Figur 12.



Figur 12: Frekvensregistrering från Sydsverige vid störningen den 17 februari 2023, kl 16:09.

<sup>13</sup> [Plutselig endret flytretningen seg på NordLink — EnergiWatch](#)

<sup>14</sup> EPC = Emergency Power Control; Nödeffektingrepp, ofta i fasta steg om 50-150 MW



Även torsdagen den 10 september 2020 inträffade en liknande händelse på NordLink<sup>15</sup>. Då gick effekten från 100 MW export till 1400 MW import, där effekten låg kvar under cirka en minut för att sedan gå ned till noll. Sju gasturbiner i Sverige automatstartade.

Detta är en helt ny typ av felfall, som inte varit känd i en bredare krets. Plötsligt faller "bortfall av F3 eller O3" som dimensionerande enkelfelskriterium i det nordiska kraftsystemet, och vi har istället att förhålla oss till en HVDC-länk som plötsligt byter riktning; i värsta fallet från full effekt åt ena hållet till full effekt åt andra hållet, dvs en plötslig förändring av effektbalansen om 2800 MW.

### 3.6.6 Avbrottsstatistik för nordiska HVDC-länkar

Det finns redan idag ett stort antal omriktaranslutna överföringsförbindelser kopplade till det nordiska systemet, se Figur 13, som är hämtad från [14]. Det är känt att omriktaranslutna förbindelser har en större felbenägenhet än traditionella ledningar och produktionsenheter. Felorsakerna och reaktionen från omriktaranläggningen kan vara olika, från plötslig bortkoppling till nedstyrning eller kommuteringsfel, som skickar ut transienter på anslutande nät. Beroende på den allt ökande mängden omriktaranslutna produktion i kombination med den relativt höga felfrekvensen vill Svenska kraftnät ogärna ansluta större enskilda (single point of failure) enheter än 700 MW. Eftersom det finns betydligt mer statistik för HVDC-överföringar än för omriktaranslutna produktionsanläggningar har antalet fel per år för några närliggande omriktarstationer tagits fram, se Figur 14 samt Figur 15 till Figur 18. Vissa anläggningar är nyare, andra äldre och vissa är av modernare VSC<sup>16</sup>-teknik medan andra är av klassisk LCC<sup>17</sup>-teknik. I figurtexterna anges driftsättningsår, omriktartyp och maxeffekt. Det är rimligt att tänka sig att tillkommande omriktaranslutna produktion företrädesvis kommer att vara av VSC-teknik.

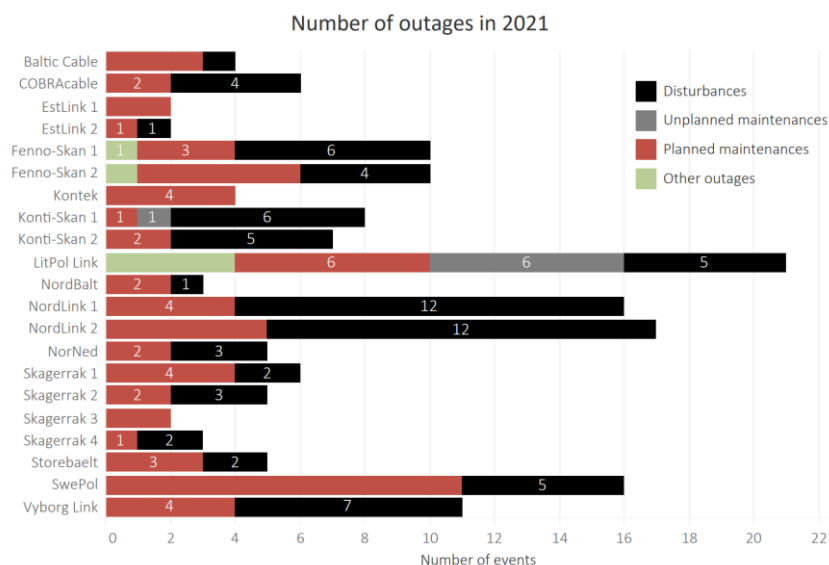


Figur 13 HVDC-länkar som ansluter till det nordiska systemet [14].

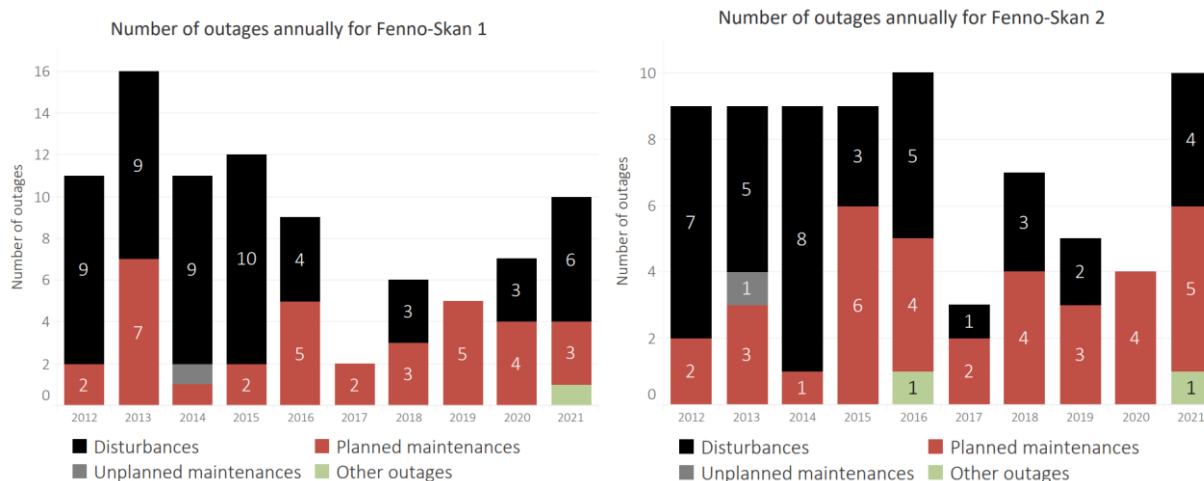
<sup>15</sup> [Feil under testing av NordLink | Statnett](#)

<sup>16</sup> VSC – Voltage Source Converter

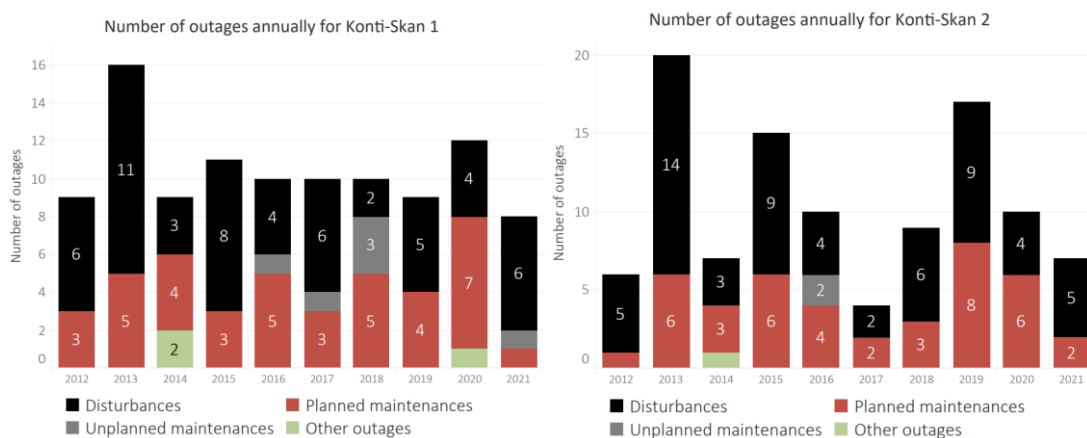
<sup>17</sup> LCC – Line Commutated Converter



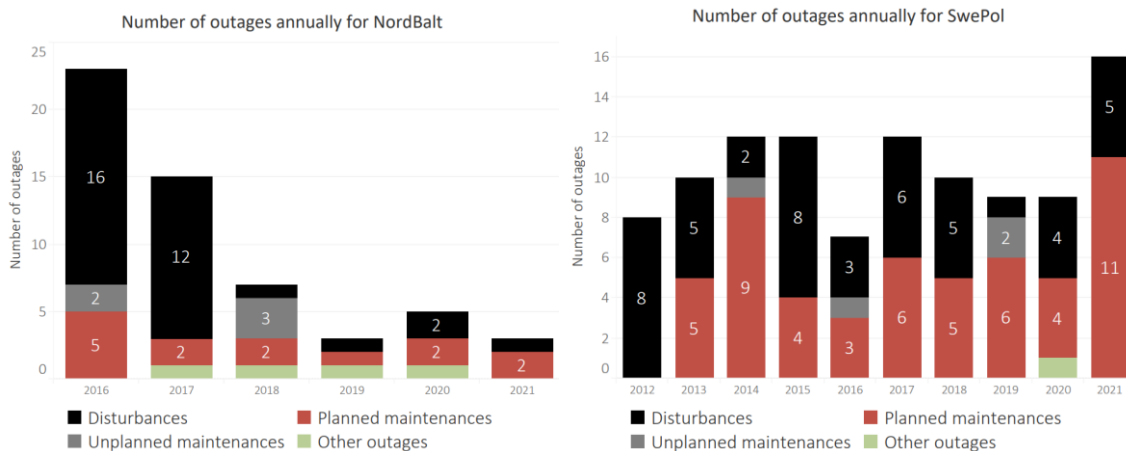
**Figur 14 Antalet störningsavbrott, och andra typer av avbrott under 2021 för nordiska HVDC-länkar [14].**



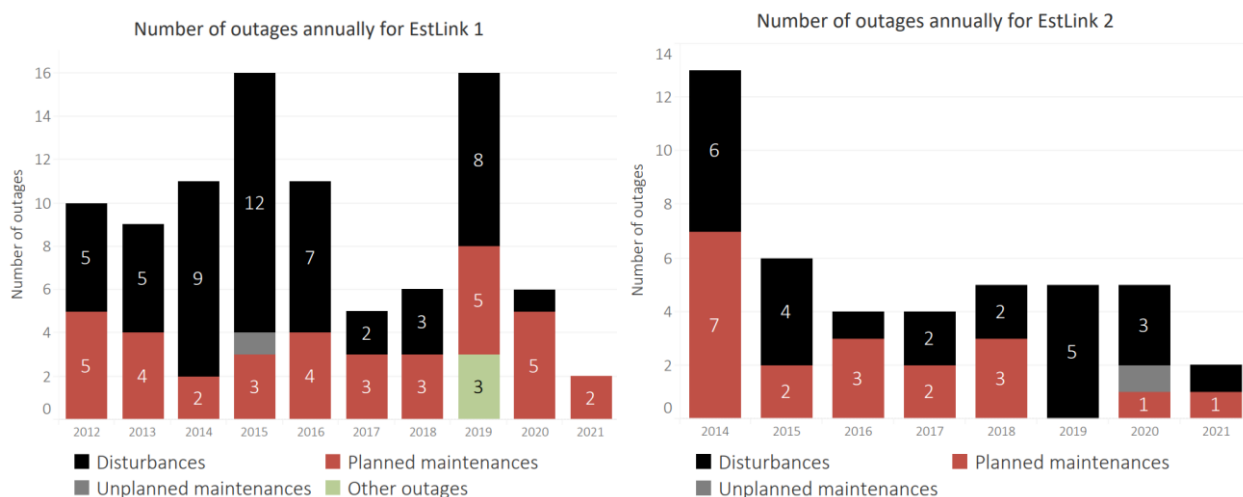
**Figur 15 Antalet störningsavbrott, och andra typer av avbrott för Fenno-Skan 1 (1989 / LCC / 400 MW) och Fenno-Skan 2 (2011 / LCC / 800 MW) [14].**



**Figur 16 Antalet störningsavbrott, och andra typer av avbrott för Konti-Skan 1 (2008 / LCC / 370 MW) och Konti-Skan 2 (1988 / LCC / 370 MW) [14].**



**Figur 17 Antalet störningsavbrott, och andra typer av avbrott för NordBalt (2016 / VSC / 700 MW) och SwePol (2000 / LCC / 600 MW) [14].**



**Figur 18 Antalet störningsavbrott, och andra typer av avbrott för Estlink 1 (2006 / VSC / 350 MW) och Estlink 2 (2014 / LCC / 650 MW) [14].**

Det är rimligt att räkna med ett ensiffrigt antal störningar per år och omriktaransluten produktionsanläggning. Det blir också rimligt att anta att de flesta störningarna innebär ett plötsligt produktionsbortfall, utan andra påtagliga transienter ut på transmissionsnätet än ett frekvensfall som kompenseras bort av FCR-D<sup>18</sup>. Dock är det rimligt att anta att vissa störningar kommer att ge en återverkning på spänningsprofilen i anslutande nät, en transient eller stående våg av något slag.

<sup>18</sup> FCR-D: Frequency Containment Reserve; dvs. momentan störningsreserv

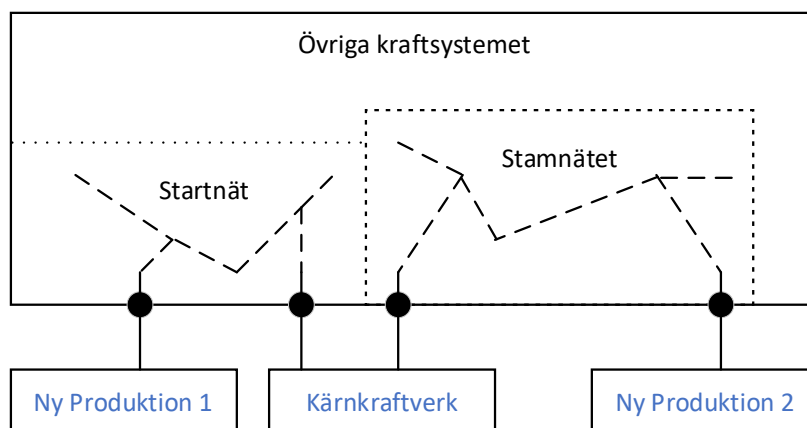
## 4 STUDIER OCH ANALYSER SOM SKA GENOMFÖRAS

Studier och analyser som ska genomföras avser:

- Elkvalitetsförändringar i kärnkraftverkets anslutningspunkter.
- Den tillkommande anläggningens resonans- och dämpningsegenskaper.
- Stabilitet och feltolerans hos reglersystem, och andra förhållanden, såsom konsekvenser och risker kopplade till ett felaktigt designat, konfigurerat eller parametriserat reglersystem i den tillkommande anläggningen som påverkar utbytet av aktiv eller reaktiv effekt i anslutningspunkten för den tillkommande anläggningen och hur denna påverkan påverkar förhållandena i det närliggande kärnkraftverket.
- Påverkan på kärnkraftverkets effektutmatningsmöjligheter, t ex begränsning till följd av kapacitetsbegränsning i stamnätet

### 4.1 Förenklad beskrivning av analysmodellen

En förenklad beskrivning av analysmodellen visas i Figur 19. För analysen delas kraftsystemet upp i tre delar, betraktat kärnkraftverk med sina anslutningspunkter till det övriga kraftsystemet, den nya produktionen med sin anslutningspunkt till det övriga kraftsystemet, samt det övriga kraftsystemet. För att identifiera påverkan på befintlig kärnkraft görs analyser, med och utan den planerade nya produktionen, varvid förhållandena i kärnkraftverkets anslutningspunkter observeras. I Figur 19 antas "Ny Produktion 1" vara ansluten nära kärnkraftverkets startnät (70 alternativt 130 kV regionnät) och "Ny Produktion 2" antas vara ansluten nära kärnkraftverkets stamnätsanslutning.



Figur 19: Överordnad modellbeskrivning för analys av inverkan av ny produktion

### 4.2 Analysförutsättningar

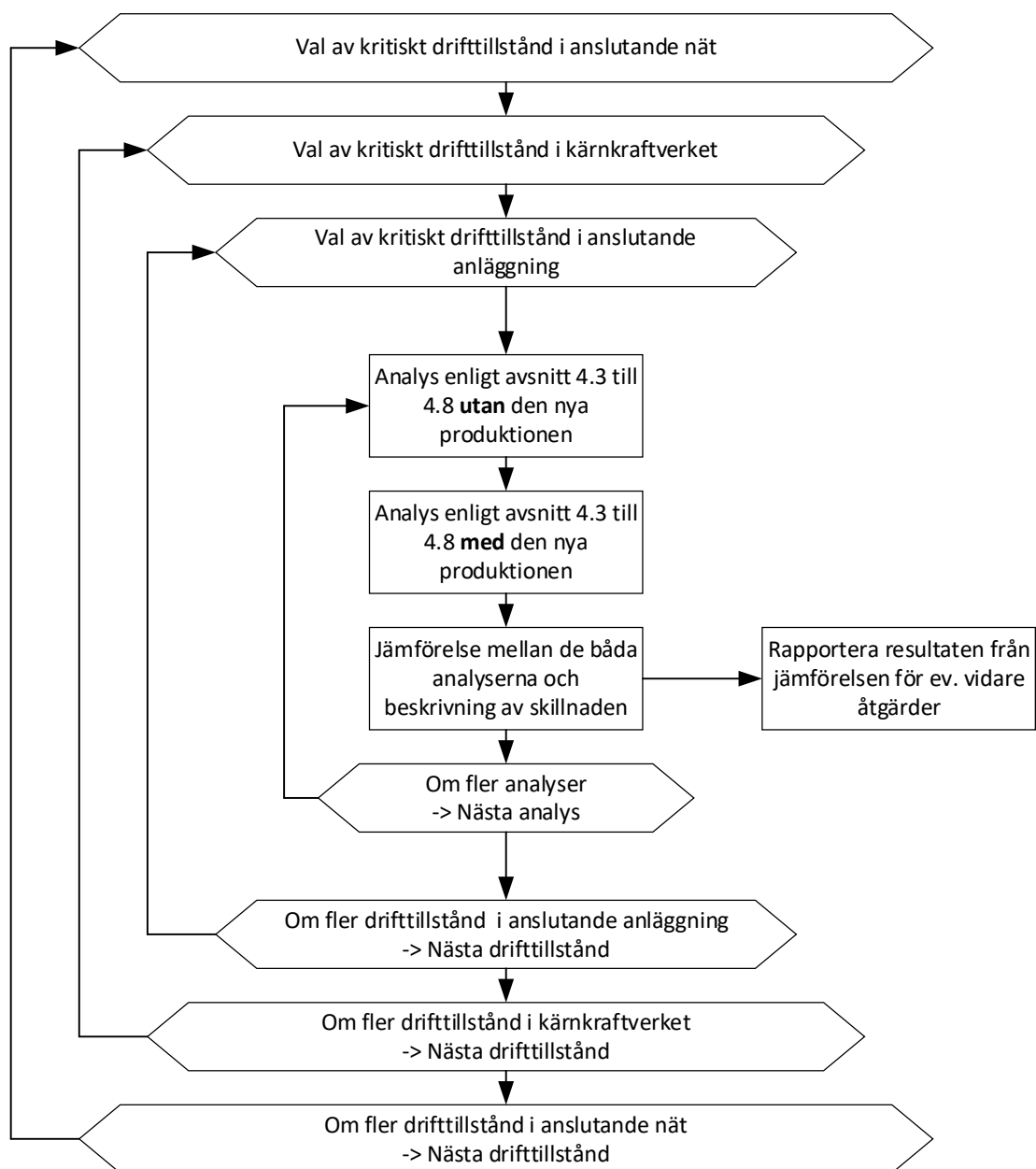
De olika analyserna enligt avsnitt 4.3 till 4.8 nedan baseras på driftförutsättningar i det övriga kraftsystemet, driftförutsättningar i det betraktade kärnkraftverket och driftförutsättningar i den tillkommande produktionsanläggningen. Med driftförutsättningar menas allt det som tillsammans ger en löst belastningsfördelning för betraktat kraftsystem, dvs kopplingsläge för ingående anläggningsdelar, spänningsnivå, samt aktivt och reaktivt effektutbyte.

Vidare ingår funktionalitet och egenskaper för de anläggningsdelar med tillhörande skydds- och kontrollutrustning, reglersystem, mm, som berörs, dvs påverkas, aktiveras, agerar, vid den specifika analysen, enligt avsnitten 4.3 till 4.8, nedan.

En analys innehåller åtminstone nedanstående delar. Ofta begränsas arbetet till att enbart omfatta de vanligaste och de mest kritiska kombinationerna av olika driftförhållanden.

- 1) Val av drifttillstånd i det övriga kraftsystemet
  - a. Kopplingsläge i nätet, speciellt i närheten av kärnkraftverket och den tillkommande produktionen; speciellt anläggningsdelar ur drift för underhåll eller felavhjälpning
  - b. Lastnivå, export/import, produktionssammansättning
- 2) Val av drifttillstånd för kärnkraftverket
  - a. Aktiv effektproduktion
  - b. Reaktiv effektproduktion och typ av spänningsreglering
  - c. Kopplingsläge för hjälpkraftsystemen
- 3) Val av drifttillstånd i tillkommande anläggning
  - a. Kopplingsläge, speciellt impedanser mellan produktionsenheter och anslutningspunkten
  - b. Aktiv effektproduktion, och eventuell effektreglering
  - c. Reaktiv effektproduktion och typ av spänningsreglering (Q, V, cosfi), dödband, etc.
- 4) "Analys" enligt avsnitten 4.3 till 4.8 nedan, **utan** den nya produktionen
- 5) "Analys" enligt avsnitten 4.3 till 4.8 nedan, **med** den nya produktionen
- 6) Jämför analyserna enligt 4) och 5) ovan och beskriv skillnaderna  
- Rapportera resultatet av jämförelsen, för eventuellt vidare åtgärder.
- 7) Om fler analyser - återstår tillbaks till 4)
- 8) Om fler drifttillstånd återstår för tillkommande anläggning - tillbaks till 3)
- 9) Om fler drifttillstånd - för kärnkraftverket återstår - tillbaks till 2)
- 10) Om fler drifttillstånd i det övriga systemet återstår - tillbaks till 1)

Analysförfarandet enligt ovan visas i förenklad flödesdiagramform i Figur 20.



Figur 20: Flödesdiagram som illustration för analysförfarandet.

### 4.3 Nättillgänglighet

Förändring av nättillgänglighet i kärnkraftverkets anslutningspunkter, och därmed risken för begränsning av produktionen i kärnkraftverket, ska analyseras och beskrivas för

- 1) alla stadier av anslutningen av den tillkommande produktionen, som har påverkan på nätets tillgänglighet,
- 2) alla tänkbara produktionsnivåer hos den tillkommande produktionen, och
- 3) förekommande avbrott och underhållsarbeten i nätet.

Typiskt planerbara tillgänglighetsbegränsningar uppstår i samband med avbrott på anläggningsdelar i anslutande nät, t ex i samband med inslackning av den tillkommande produktionsanläggningen. Analysen ska inkludera en känslighetsanalys, som åtminstone omfattar tiden för planerade nätbegränsningar i stamnätet, där den tillkommande anläggningen påverkar vilken effekt som kan matas ut från kärnkraftverket.

## 4.4 Elkvalitet

Förändringen av elkvaliteten i anslutningspunkterna, till följd av anslutningen av den nya produktionen, för alla förekommande drifffall och kopplingslägen, ska analyseras med avseende på

- Spänningens nivå och behovet av reaktiv effekttreglering från kärnkraftverket
  - Tidsserier tas fram som visar förändringen i reaktiv effektutmatning från kärnkraftverket för att hålla spänningen i kärnkraftverkets anslutningspunkt oförändrad jämfört med förhållandena utan den tillkommande anläggningen; idealt ingen förändring.
- Övertoner, undertoner, mellantoner och så kallade supratoner i spänningen
  - Tidsserier tas fram som visar dessa toners nivåer i kärnkraftverkets anslutningspunkt, före och efter nyanslutningen, samt 1) de tillkommande förluster som dessa toner orsakar i kärnkraftverket, dvs direkta förlustkostnader, kostnader för ökad kylning och kostnader för minskad livslängd, och 2) den reduktion i nyttjandegrad som dessa toner eventuellt åsamkar vissa objekt inom kärnkraftverket, som i sin tur kan leda till minskad effektivitet eller lönsamhet.
- Flimmer i spänningen
  - Tidsserier tas fram som visar förändringen av flimmernivåerna i kärnkraftverkets anslutningspunkt, samt 1) de tillkommande förluster som dessa flimmernivåer orsakar i kärnkraftverket, dvs direkta förlustkostnader, kostnader för ökad kylning och kostnader för minskad livslängd, och 2) den reduktion i nyttjandegrad som dessa flimmernivåer eventuellt åsamkar vissa objekt inom kärnkraftverket, som i sin tur kan leda till minskad effektivitet eller lönsamhet.
- Spänningsosymmetrin, dvs halten av minus- och nollföljdsspänning
  - Tidsserier tas fram som visar förändringen av spänningsosymmetrin i kärnkraftverkets anslutningspunkt, samt 1) de tillkommande förluster som osymmetrin orsakar i kärnkraftverket, dvs direkta förlustkostnader, kostnader för ökad kylning och kostnader för minskad livslängd, och 2) den reduktion i nyttjandegrad som osymmetrin eventuellt åsamkar vissa objekt inom kärnkraftverket, som i sin tur kan leda till minskad effektivitet eller lönsamhet.

Förändringarna i elkvalitet är att betrakta som kontinuerliga, men kan bero av kopplingsläge, produktionsnivåer, mm.

## 4.5 Plötslig händelse i kraftsystemet

En plötslig händelse i kraftsystemet kan vara ett fel eller en koppling, som

- 1) Plötsligt och *transient* ändrar spänningens amplitud, fasläge eller frekvens, i kärnkraftverkets anslutningspunkter; speciellt inkoppling av transformatorer, shuntkompensering och långa kablar har historiskt visat sig problematiska
- 2) Plötsligt och *permanent*, eventuellt i sekvens (t ex vid felbortkoppling), ändrar förhållandena i anslutande nät, sett från kärnkraftverkets anslutningspunkter (t ex kortslutningsimpedansen)

Sådana händelser kan delas in i tre grupper

- 1) Händelser som ansluten produktionsanläggning ska uthärda med bibehållen nätanslutning och bibehållen effektutmatning
- 2) Händelser som ansluten produktionsanläggning ska uthärda med bibehållen nätanslutning, men där anpassning av effektutmatningen tillåts
- 3) Händelser som är så svåra att ansluten produktionsanläggning tillåts att kopplas bort från nätet.

Plötsliga händelser i kraftsystemet ska analyseras med hänsyn till svårighetsgrad och inträffandefrekvens enligt följande

- 1) Vanligt förekommande fel, såsom kortslutning och jordfel, övergående respektive permanent, med *korrekt felbortkoppling*
- 2) Vanligt förekommande fel, såsom kortslutning och jordfel, övergående respektive permanent, med *reservbortkoppling*
- 3) Sällan förekommande fel, såsom kortslutning mellan olika anläggningsdelar eller besvärliga fellägen (t ex mellan strömtransformator och brytare), med *normal felbortkoppling*
- 4) Sällan förekommande fel, såsom kortslutning mellan olika anläggningsdelar eller besvärliga fellägen (t ex mellan strömtransformator och brytare), med *reservbortkoppling*
- 5) Förekommande kopplingar i nätet i närheten av kärnkraftverket eller den tillkommande produktionsanläggningen

Inom varje grupp enligt ovan väljs ett begränsat antal händelser ut för analys enligt principen "värsta tänkbara", med avseende på feltyp, och felläge. Därefter upprepas analysen för det mest kritiska fallet inom varje grupp, med tänkbar brist, en brist åt gången, i den tillkommande anläggningen. Sådan brist kan vara

- 1) Felfungerande spänningsreglering, t ex i fel driftmod
- 2) Felfungerande pendlingsdämpning, t ex PSS icke aktiv eller med felaktiga parametrar
- 3) Kommuteringsfel följt av bortkoppling av den tillkommande anläggningen

## 4.6 Plötslig händelse i tillkommande produktionsanläggning

Analysen enligt avsnitt 4.5 upprepas för plötsliga händelser inom den tillkommande produktionsanläggningen.

## 4.7 Resonans och dämpning

Resonans- och dämpegenskaper hos den tillkommande anläggningen och dess reglersystem bestäms, för alla förekommande driftfall och kopplingslägen inom anläggningen enligt följande

- Anläggningens impedansegenskaper sedda från anslutningspunkten bestäms för olika frekvenser
- Anläggningens egenfrekvenser bestäms genom en plötslig spänningsändring i anslutningspunkten, t ex inkoppling av shuntreaktor

## 4.8 Stabilitet och feltolerans inom tillkommande anläggning

Stabilitet och feltolerans för system och komponenter inom den tillkommande anläggningen vad avser funktioner och förhållanden som påverkar yttre nät och därmed andra anläggningar ska beskrivas i termer av redundans och feltålighet, vad gäller

- Felbortkoppling
- Skydd mot onormala driftförhållanden, t ex spänningens amplitud, frekvens, symmetri
- Spänningsreglering
- Aktiv effektreglering
- Omriktarens reglersystem



## 5 KRAV PÅ ANALYSVERKTYG OCH MODELLERING

Generellt gäller att såväl modeller som analysverktyg ska vara lämpliga för studium av det fenomen man avser att analysera. Modellerna ska även vara tillräckligt detaljerade, inte bara för huvudkomponenter, utan även för skydds- och reglersystem. Modellerna som används vid de olika analyserna ska omfatta lämpliga delar av kraftsystemet, den tillkommande produktionsanläggningen och det betraktade kärnkraftverket, för respektive analys. Vidare ska detaljeringsnivå på modellerna vara tillräcklig för att analysresultatet ska vara tillförlitligt. Analysverktyg och modeller ska, så långt möjligt, vara internationellt erkända, verifierade och beprövade.

Följande analysområden måste kunna täckas in

- Elkvalitet, omfattande
  - kvasistationär spänningsnivå (spänningsreglering)
  - förekomst av andra frekvenser än 50 Hz
  - förekomst av flimmer
  - förekomst av osymmetri
- Effektflöden och felströmsberäkningar, dvs
  - belastningsfördelningsberäkningar
  - felströmsberäkningar för jordfel och kortslutningar
- Kraftsystemdynamik, för kraftsystemets huvudkomponenter och deras reglersystem, begränsare, mm, för analys av systemvida och lokala effektpendlingar, såsom i samband med fel och felbortkoppling, kontroll av fault-ride-through-egenskaper, mm
- Småsignalstabilitet och egenvärdesanalys, för kontroll av egenfrekvenser, resonanser, risk för subsynkron resonans, mm
- Transienter, för kontroll av omriktarnas immunitet och stabilitet, omfattande
  - ledningsbundna kopplingstransienter, t ex orsakade av strömbrytare
  - ledningsbundna atmosfäriska överspänningar, främst till följd av blixtnedslag

För respektive analys behövs modeller av befintligt kraftsystem, befintligt kärnkraftverk, med huvudgenerator och hjälpkraftsystem, samt tillkommande omriktaransluten produktionsanläggning, med dess kringutrustning, skydds- och reglersystem. För befintligt kärnkraftverk är det stamnätsanslutningen alternativt startnätsanslutningen som utgör anslutningspunkten.

Modeller och analysverktyg ska väljas med sådan detaljeringsgrad, noggrannhet och upplösning att de specificerade analyserna i avsnitt 4 kan genomföras med tillförlitliga resultat.

### 5.1 Analysverktyg

Analysverktygen ska vara lämpliga för sitt ändamål, väl beprövade och internationellt erkända. Det är även viktigt att det finns lämpliga modeller anpassade för verktyget och som speglar den verklighet man avser att modellera. I Tabell 2 visas några exempel på erkända analyspaket för olika applikationer.

**Tabell 2: Exempel på lämpliga analysprogramvaror**

Analysområde	Exempel på lämpligt analysprogram
Elkvalitet	ETAP, Cyme, PowerFactory, PSAT+Harmonics module
Effektflöde och felströmmar, RMS-värdesanalyser	PSS/E, PowerFactory, PSAT
Kraftsystemdynamik, enfasiga RMS-värdesanalyser	PSS/E, PowerFactory, SimPow, TSAT
Småsignalstabilitet, egenvärdesanalys	NEVA-PSS/E, PowerFactory, SSAT
Transientanalys, momentanvärdesanalyser	PSCAD/EMTDC, PowerFactory

## 5.2 Modeller

Till flertalet analyspaket finns ett rikt utbud av färdiga modeller för olika komponenter och reglersystem. Ofta är dessa lämpliga och kan med passande parametrering vara fullt användbara. Dock är det så att utvecklingen inom omriktarsystem och förnyelsebar elproduktion går fort och modellutvecklingen hamnar ofta på efterkälken. I de europeiska regelverken, se avsnitt 6, ställs långtgående krav på tillverkare och leverantörer om att tillhandahålla relevanta modeller. I undantagsfall tvingas man utveckla egna modeller ("user defined") utifrån en generell plattform, för att få ett tillförlitligt analysresultat.

### 5.2.1 Andra frekvenser än 50 Hz

För analys av andra frekvenser än 50 Hz måste impedanser modelleras som resistanser (R), induktanser (L) och kapacitanser (C). Det fungerar inte med reaktanser ( $\omega L$ ) och susceptanser ( $\omega C$ ) anpassade för 50 Hz. Ofta är det strömmar i form av övertoner, undertoner, mellantoner eller supratoner, som injiceras av den "störande" utrustningen in i nätet. Nätets impedanser för den aktuella frekvensen ger då upphov till spänningar av motsvarande frekvens, som kan vara skadliga för utrustning, orsaka förluster, forcera åldrande, reducera kapacitet, mm.

### 5.2.2 Flimmer

För analys av flimmer måste impedanser modelleras som resistanser (R), induktanser (L) och kapacitanser (C). Det fungerar inte med reaktanser ( $\omega L$ ) och susceptanser ( $\omega C$ ) anpassade för 50 Hz. Flimmer kan betraktas som en lågfrekvent överlagrad spänningssignal, som kan vara upp till c:a 10 Hz. Flimmer kan orsakas av regelbundna pulsationer i effektproduktion, belastning eller reaktivkompensering. De aktuella flimmerspänningarna kan vara skadliga för utrustning, orsaka förluster, forcera åldrande, reducera kapacitet, mm.

### 5.2.3 Osymmetri

För analys av osymmetrier och deras utbredning erfordras plus-, minus- och nollföljdsmodeller av samtliga komponenter som ingår i analysen. Speciellt viktigt är eventuell utbredning av minusföljdsströmmar, som redan vid relativt låga nivåer ger upphov till stor termisk belastning på roterande maskiner.

### 5.2.4 Effektflöde och felströmmar

För alla tänkbara effektflödesberäkningar är det tillräckligt med en symmetrisk betraktelse och en enfasig (plusföljds-) modell fungerar utmärkt.

För felströmsberäkningar ställs krav på både jordfelsanalys och beräkning av kortslutningsströmmar. Därför erfordras plus-, minus, och nollföljdsdata för berörda anläggningsdelar.

### 5.2.5 Kraftsystemdynamik

Kraftsystemdynamik, såsom effektpendlingar, spänningsfluktuationer, mm, och som inbegriper reglersystem, modelleras ofta med symmetriska modeller och en ekvivalent plusföljdsbetraktelse. För enstaka osymmetrier, t ex icke-fungerande brytarpol, kan ofta ekvivalenta impedanser användas för att få en tillförlitlig analys.

### 5.2.6 Småsignalstabilitet och egenvärdesanalys

Småsignalanalys och egenvärdesberäkningar, betraktar ett brett frekvensspektrum och kräver modeller som är representativa både för frekvenser över och under 50 Hz. Av speciellt intresse är risken för subsynkron resonans, där långa turbinsträngar kan ha resonansfrekvenser under 50 Hz. Förstärkning av sådan frekvenser av annan närliggande utrustning, t ex seriekompensering eller omriktaranslutna anläggningar kan orsaka svåra haverier<sup>19</sup>.

### 5.2.7 Transienter

Transienter är högfrekventa, kopplingstransienter i kHz området och atmosfäriska överspänningar i MHz området, och noggrann modellering av berörda komponenter inom ett geografiskt mindre område blir viktigt. Strökapacitanser blir viktiga liksom strömblockerande induktanser. Risken är i första hand att transienter ställer till oreda i omriktaranläggningen, som sedan får konsekvenser ut i kraftsystemet.

---

<sup>19</sup> [Subsynchronous resonance - SSR \(windows.net\)](#)

## 6 REGELVERK

Det finns ett omfattande regelverk, som måste följas, när det gäller nyetablering av elproduktion på de spänningsnivåer som är relevanta för kärnkraftverkens effektutmatning och startnät. Regelverken är ofta uppbyggda i form av krav som ska uppfyllas. Kraven varierar med effektinmatningens storlek, typ av produktionsenhet och anslutningens spänningsnivå.

Regelverkens högsta nivå är EU-förordningar, som per automatik ska bli lag i alla medlemsstater. Därefter kommer nationella lagar, förordningar, och föreskrifter, samt anslutningsvillkor uppsatta av anslutande elnätsföretag eller Svenska kraftnät. Svenska kraftnät utfärdar numera inga föreskrifter som berör nya produktionsanläggningars påverkan på driftsäkerheten i det nationella elsystemet. Sådana föreskrifter utfärdas av Energimarknadsinspektionen. Strålsäkerhetsmyndigheten utfärdar långtgående föreskrifter om kärnkraftverkens skyldigheter när det gäller säkerhetsfunktioner och djupförsvår. Elsäkerhetsverket har utfärdat en ansenlig mängd föreskrifter som är tillämpbara vid nyetablering av elproduktion. Dessa har dock endast indirekt inverkan på förhållandena i anslutande nät.

Regelverken gäller normalt i någon form av hierarkisk ordning, om motstridigheter skulle uppstå. Ofta, men inte alltid, påtalas i regelverken undantag från krav som väsentligen skulle försvåra kravuppfyllelse av andra högre prioriterade krav, t ex relaterade till nukleära, hydrologiska, hydrodynamiska, meteorologiska eller miljömässiga omständigheter. Sålunda överskuggar Strålsäkerhetsmyndighetens krav och bestämmelser all verksamhet på ett kärnkraftverk. Strålsäkerheten är viktigare än allting annat och SSM:s krav överrider därför alla andra krav.

### 6.1 EU-förordningar och EU-direktiv

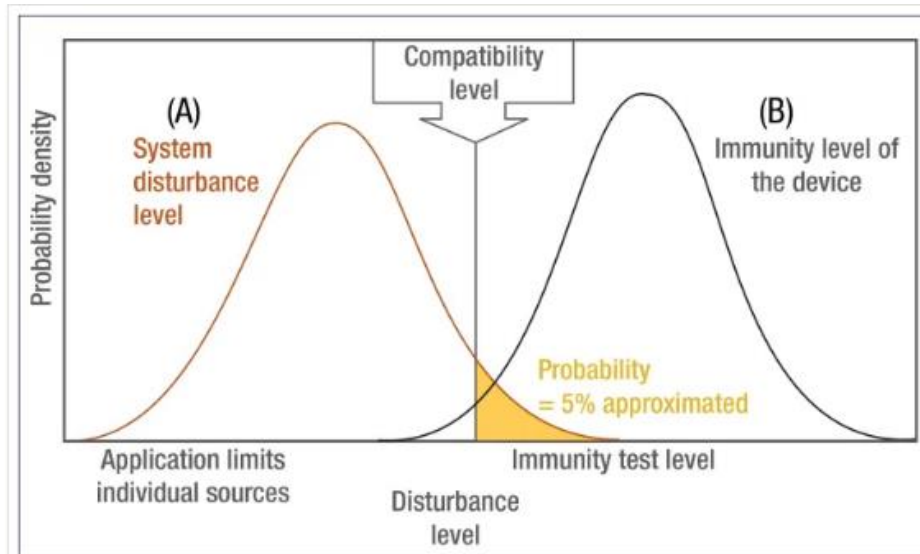
De EU-förordningar och EU-direktiv som kan vara aktuella vid nyanslutning av elproduktion och som har direkt påverkan på förhållandena i anslutande nät är:

- KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) 2016/631 av den 14 april 2016 om fastställande av nätföreskrifter med krav för nätanslutning av generatorer (den så kallade RfG:n)
- KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) 2016/1447 av den 26 augusti 2016 om fastställande av nätföreskrifter med krav för nätanslutning av system för högspänd likström och likströmsanslutna kraftparksmoduler (HVDC-koden)
- KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) 2016/1388 av den 17 augusti 2016 om fastställande av nätföreskrifter för anslutning av förbrukare (DCC-koden)
- KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) 2017/1485 av den 2 augusti 2017 om fastställande av riktlinjer för driften av elöverföringssystem (tidigare kallad System Operation Guideline)
- EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV (EU) 2014/30 av den 26 februari 2014 om harmonisering av medlemsstaternas lagstiftning om elektromagnetisk kompatibilitet  
- Bestämmelserna i detta direktiv gäller utrustnings elektromagnetiska kompatibilitet. Syftet är att säkerställa den inre marknadens funktion genom att kräva att utrustning ska överensstämma med en adekvat nivå av elektromagnetisk kompatibilitet.

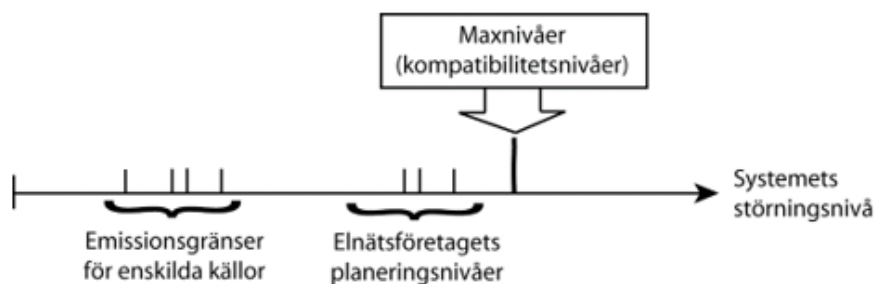
En förutsättning för anslutning av ny produktion är att den nya / de nya produktionsenheterna följer RfG:n [8] och EiFS 2018:2 [9], som framför allt anger krav på bibehållen nätanslutning och effektutmatning för olika förhållanden i anslutningspunkten. Vidare ställs krav på vissa regleregenskaper.

Elkvaliteten i anslutningspunkten får rimligtvis inte avsevärt försämrats till följd av den tillkommande produktionen och det är till stor del upp till anslutande elnätsföretag att bestämma om hur tillgängligt störutrymme, se Figur 21 och Figur 22, fördelas mellan befintliga, tillkommande, och framtida elnätsanvändare. Ellagen kräver att överföringen av el ska vara av god kvalitet. Föreskrifter och standarder specificerar kraven på "god elkvalitet". Sedan är det upp till elnätsföretagen att

ställa krav på anslutna anläggningar. En sådan fördelning av tillgängligt störutrymmet ska uppfylla alla tänkbara krav vad gäller opartiskhet, icke-diskriminering, etc., som en nätägare måste underkasta sig.



Figur 21: Störnivån i ett elnät (A) måste alltid vara mindre än immunitetsnivån hos ansluten utrustning (B)



Figur 22: Marginaler mellan emissionsgränser för enskilda storkällor och elnätsföretagens planeringsnivåer måste vara betryggande

Artikel 41 och 42 (RfG) anger ganska detaljerat "berörd systemansvarigs" ansvar och arbetsuppgifter som åligger denne.

Berörd systemansvarig:

- Ska under hela kraftproduktionsanläggningens livstid bedöma en kraftproduktionsmoduls överensstämmelse med kraven i RfG. Ägaren av kraftproduktionsanläggningen ska informeras om resultatet av bedömningen.
- Har rätt att begära att ägaren av kraftproduktionsanläggningen gör överensstämmelseprov och simuleringar.
- Ska offentliggöra en förteckning över information och dokument som ska tillhandahållas samt de krav som ska uppfyllas av ägaren av kraftproduktionsanläggningen.
- Ska offentliggöra ansvarsfördelningen mellan ägaren av kraftproduktionsanläggningen och den systemansvarige när det gäller överensstämmelseprovning, simulering och övervakning.
- Får helt eller delvis delegera utförandet av övervakningen av överensstämmelse till tredje parter.
- Får inte utan skäl undanhålla det driftsmeddelande som avses i avdelning III (i RfG) om inte överensstämmelseprov eller simuleringar kan genomföras enligt överenskommelse mellan den berörda

systemansvarige och ägaren av kraftproduktionsanläggningen till följd av orsaker som kan tillskrivas den berörda systemansvarige.

Överensstämmelseprovnigen:

- Ska syfta till att visa att kraven i RfG:n har uppfyllts.
- Den berörda systemansvarige ha rätt att:
  - tillåta att ägaren av kraftproduktionsanläggningen genomför en alternativ uppsättning av prov, under förutsättning att dessa prov är effektiva och tillräckliga för att visa överensstämmelse med kraven i RfG.
  - kräva att ägaren av kraftproduktionsanläggningen genomför ytterligare eller alternativa uppsättningar av prov i de fall där den information som lämnats till den berörda systemansvarige i samband med överensstämmelseprovning inte är tillräcklig för att visa överensstämmelse med kraven i RfG.
  - kräva att ägaren av kraftproduktionsanläggningen genomför lämpliga prov för att visa en kraftproduktionsmoduls prestanda vid drift med alternativa bränslen eller bränsleblandningar.
- Ägaren av kraftproduktionsanläggningen ansvarar för att genomföra proven enligt villkoren i kapitlen 2, 3 och 4 i avdelning IV av RfG. Den systemansvarige ska samarbeta och får inte i onödan fördröja genomförandet av proven.
- Den systemansvarige får delta vid överensstämmelseprovnigen, antingen på plats eller på distans via den systemansvariges kontrollrum. För detta ändamål ska ägaren av kraftproduktionsanläggningen tillhandahålla den övervakningsutrustning som är nödvändig. Signaler som anges av den berörda systemansvarige ska tillhandahållas om den systemansvarige önskar använda sin egen utrustning för att övervaka proven. Den systemansvarige beslutar själv om eventuellt deltagande.

## 6.2 Svenska lagar

De svenska lagar som kan vara aktuella vid nyanslutning av elproduktion och som har direkt påverkan på förhållandena i anslutande nät är:

- Ellag (1997:857)  
Ellagen innehåller allmänna bestämmelser om anslutning till elnätet och överföring av el, samt bestämmelser om övergripande systemansvar, driftsäkerhet och balansansvar.
- Elsäkerhetslag (2016:732)  
Elsäkerhetslagen innehåller skyldigheter ifråga om elektriska anläggningar och elektrisk utrustning, men även ansvarsbestämmelser för skada som orsakas av el från en starkströmsanläggning, skada som orsakas av säkerhetsbrist i el, eller skada vid driftstörning.

Av speciellt intresse är elsäkerhetslagens paragrafer 7 och 31, om tillkommen elektrisk anläggning och potentiell skaderisk för redan befintlig anläggning. Ansvaret gäller såväl sakskada, t ex skada på utrustning eller komponenter, som ren förmögenhetsskada, t ex driftstörning och förlorade intäkter eller ökade kostnader.

### **Elsäkerhetslagen 7 §:**

"Om en tillkommen elektrisk anläggning kan vålla personskada eller sakskada eller driftstörning genom inverkan på en annan redan befintlig elektrisk anläggning, ska innehavaren av den förstnämnda anläggningen vidta de åtgärder som behövs vid den anläggningen för att förebygga sådan skada eller störning."

- Föreliggande arbete kan ses som en hjälp för nytillkomna produktionsägare att bestämma erforderliga åtgärder för att förhindra skada eller störning för annan anläggning.

### **Elsäkerhetslagen 31 §:**

”Om en personskada, sakskada eller ren förmögenhetsskada orsakas av att el från en elektrisk anläggning stör driften vid en annan elektrisk anläggning och störningen uppstått till följd av uppsåt eller vårdslöshet hos innehavaren av den förstnämnda anläggningen, ska den innehavaren ersätta skadan.”

- Åsidosättande av de analyser som rekommenderas i föreliggande arbete, och som leder till skada eller driftstörning, måste vara att betrakta som vårdslöshet, alternativt uppsåt.

## **6.3 Svenska förordningar**

De svenska förordningar som kan vara aktuella vid nyanslutning av elproduktion och som har direkt påverkan på förhållandena i anslutande nät är:

- Förordning (1994:1806) om systemansvaret för el
  - Förordningen pekar på Svenska kraftnät som systemansvarig myndighet. Svenska kraftnät ska utöva tillsyn över att ellagen följs när det gäller frågor om driftsäkerheten i det nationella elsystemet. Svenska kraftnät ges befogenhet att avbryta eller begränsa överföringen av el till elanvändare.
  - Energimarknadsinspektionen får meddela föreskrift om generellt tillämpliga krav för anslutning av sådana anläggningar till elnätet som avses i EU 2016/632 och EU 2016/1447.
- Elsäkerhetsförordning (2017:218)
  - Förordningen ställer säkerhetskrav i fråga om elektrisk utrustning, så att den inte ska riskera säkerheten för människor, djur eller egendom. Elsäkerhetsverket pekas explicit ut som ansvarig för flertalet elsäkerhetsfrågor.
- Förordning (2016:363) om elektromagnetisk kompatibilitet
  - Förordningen stipulerar att: ”Utrustning får bara användas så att den fungerar tillfredsställande i sin elektromagnetiska omgivning och inte orsakar oacceptabla elektromagnetiska störningar för annan utrustning.”

## **6.4 Föreskrifter**

De föreskrifter som kan vara aktuella vid nyanslutning av elproduktion och som har direkt påverkan på förhållandena i anslutande nät är främst:

- EIFS 2013:1: Krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet
- EIFS 2018:2: Generellt tillämpliga krav för nätanslutning av generatorer (precisering av kraven i RfG:n)
- EIFS 2019:3: Generellt tillämpliga krav för nätanslutning av system för högspänd likström och likströmsanslutna kraftparksmoduler (precisering av kraven i HVDC-koden)
- EIFS 2019:6: Energimarknadsinspektionens föreskrifter om fastställande av generellt tillämpliga krav för anslutning av förbrukare (precisering av kraven i DCC-koden)

Strålsäkerhetsmyndigheten ställer i föreskriftsform krav på strålsäkerhet, genom detaljerade krav på konstruktion och drift av kärnkraftreaktorer, samt krav på en omfattande säkerhetsanalys och säkerhetsvärdering:

- SSMFS 2021:4: Konstruktion av kärnkraftreaktorer [23]
  - Speciellt kapitel 7, 3-6 §§ behandlar kraftförsörjningen och ställer även krav på system och komponenter utanför kärnkraftverket.
- SSMFS 2021:5: Värdering och redovisning av strålsäkerhet för kärnkraftreaktorer
  - Värdering ska göras med probabilistiska säkerhetsanalyser och innehålla känslighets- och osäkerhetsanalyser. Kraftförsörjning via yttre nät är en viktig del av djupförsvaret
- SSMFS 2021:6: Drift av kärnkraftreaktorer

Till var och en av dessa föreskrifter finns även ett vägledningsdokument, med mer djupgående praktiska råd och referenser till internationella överenskommelser, såsom IAEA: SSG-34. Det för föreliggande rapport mest relevanta avsnittet står att finna i vägledningsdokumentet för SSMFS 2021:4 (3 § Kraftförsörjning av kärnkraftsreaktorn, sid 242): "I enlighet med 3 kap. 2 § om samverkan vid genomförande av konstruktionsarbete medför detta ett ansvar att samverka med berörda externa parter, i detta fall parter som ansvarar för det yttre nätet. Det kan bl.a. innebära att påverka förutsättningarna genom att aktivt delta i samråd kring utformning av det yttre nätet" och "Vidare behöver kärnkraftsreaktorns intressen vid eventuella ändringar av extern kraftförsörjning bevakas, exempelvis vid samråd om ny linjedragning av externt nät."

När det gäller allmänna elsäkerhetsaspekter, innehavaransvar, driftansvar, installation, ansvar för skötsel och underhåll, mm, så blir det Elsäkerhetsverkets föreskrifter som ska följas. De viktigaste när det gäller tillkommande omriktaransluten produktion i närheten av befintligt kärnkraftverk är:

- ELSÄK-FS 2022:1 om hur starkströmsanläggningar ska vara utförda
  - Föreskriften är ganska allmänt hållen och stipulerar att "En starkströmsanläggning ska vara utförd enligt god elsäkerhetsteknisk praxis så att den ger betryggande säkerhet mot personskada och sakskada på grund av el."
  - Dock preciseras att "En starkströmsanläggning ska vara utförd så att den ger betryggande säkerhet under normala förhållanden, vid ett (1) fel i anläggningen, och vid rimligt förutsebar felbetjäning."
  - Även krav på reservbortkoppling av fel krävs explicit: "En starkströmsanläggning ska vara utförd så att människor och husdjur skyddas mot elchock som kan uppstå vid direkt beröring av spänningssatta delar eller av utsatta delar som blivit spänningssatta genom ett (1) fel."
  - Ansvar för sakskada adresseras också: "En starkströmsanläggning ska vara utförd så att den inte medför risk för personskada eller sakskada på grund av höga temperaturer, ljusbågar eller mekaniska påkänningar orsakade av ström vid normal drift eller överström."
- ELSÄK FS 2022:3 om innehavarens kontroll av starkströmsanläggningar och elektriska utrustningar
  - Föreskriften innehåller bestämmelser om fortlöpande kontroll av starkströmsanläggningar och elektriska utrustningar

## 6.5 Elnätsföretagens anslutningsvillkor, riktlinjer och allmänna råd

När det gäller anslutning till stamnätet har svenska kraftnät gett ut en vägledning "Vägledning för anslutning till stamnätet – Från ansökan till drifttagning" [11]. Dokumentet hänvisar till krav i gällande EU-lagstiftning, svenska lagar, förordningar och föreskrifter. I anslutningsavtalet med Svenska kraftnät regleras de systemtekniska kraven och villkoren för anslutning till stamnätet. Kraven kompletterar och preciserar den generella kravbilden i förordningar och föreskrifter. Anslutningsavtalet innehåller till exempel krav på spänningsreglering och reaktiv förmåga och i de Tekniska avtalsvillkoren regleras bland annat stationsutformning, felbortkoppling och elkvalitet. Vid anslutning av anläggningar till stamnätet är det Svenska kraftnät som bedömer kravuppfyllnaden och ägaren av anläggningen som är ansvarig för att verifiera kravuppfyllnaden. Processen för att verifiera kravbilden innehåller till exempel utbyte av information, överensstämmelseprovningar och överensstämmelsesimuleringar. Processen är ett samarbete mellan ägaren av den anslutande anläggningen och Svenska kraftnät och leder fram till att ett slutligt driftmeddelande kan lämnas.

Svenska kraftnäts Tekniska riktlinjer definierar de tekniska krav, säkerhetskrav och driftkrav som Svenska kraftnät ställer på komponenter i stamnätet eller i anläggningar anslutna till stamnätet. Det finns totalt 222 Tekniska riktlinjer, samtliga publicerade på Svenska kraftnäts hemsida<sup>20</sup>. De Tekniska avtalsvillkoren som adresserar vissa Tekniska riktlinjer ingår som en bilaga till anslutningsavtalet och är därmed en del av avtalsinnehållet. Av speciellt intresse är TR06-01 del 1 om spänningens egenskaper i stamnätet och TR06-01 del 2 om planerings- och emissionsnivåer, mätmetoder och ansvarsfördelning avseende elkvalitet i stamnätet.

<sup>20</sup> [Tekniska riktlinjer | Svenska kraftnät \(svk.se\)](https://svk.se/tekniska-riktlinjer)



Vattenfall Eldistributions allmänt tillgängliga beskrivning av anslutningsprocessen, på hemsidan<sup>21</sup>, avser i huvudsak de administrativa delarna. Även E.ON:s allmänt tillgängliga beskrivningar om anslutning av produktion till regionnätet är allmänt hållna och beskriver i huvudsak de administrativa stegen<sup>22</sup>.

## 6.6 Branschdokument

Det främsta branschdokumentet om anslutning av produktion till stam- eller regionnät är Energiföretagens handbok "Anslutning av större produktionsanläggningar till elnätet – ASP"<sup>23</sup>. Handboken är anpassad efter EU:s regelverk och nätkoder, främst EU 2016/631 (RfG:n) och den därtill kopplade föreskriften från Energimarknadsinspektionen, EIFS 2018:2. Storleken på produktionsanläggningen, eller anläggningarna, i förhållande till kortslutningseffekten i anslutande nät, avgör oftast om en anslutning ska ske mot region- eller lokalnät. I ASP-handboken behandlas kraftproduktionsmoduler av typerna C och D, det vill säga kraftproduktionsmoduler om 10 respektive 30 MW eller större, som ansluts till region- eller mellanspänningsnätet, där inverkan på förhållandena i regionnätet är påtaglig, samt all havsbaserad produktion. Dessa anläggningar definieras som SGU:er (betydande nätanvändare) och de flesta kommer att ingå i Svenska kraftnäts observerbarhetsområde och omfattas då även av de krav som följer av EU 2017/1485 och EIFS 2019:07<sup>24</sup>, som gäller för både befintliga och tillkommande anläggningar.

## 6.7 Standarder

Ett antal standarder har tagits fram för att uppfylla de krav som ställs i tvingande regelverk. Nedan följer några standarder som är viktiga vid anslutning av elproduktion till elnätet:

SS-EN 50110-1: Skötsel av elektriska anläggningar. Standarden fastställer krav för arbete på eller i närheten av elektriska anläggningar med spänningsnivåer fr.o.m. klenspanning t.o.m. högspänning.

SS-EN 50160: Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution. Standarden fastställer huvudegenskaperna för spänningen vid en nätanvändares anslutningspunkt i allmänna växelströmsnät under normala driftförhållanden.

SS-EN 50522: Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1 kV AC – Jordning. Standarden specificerar kraven för utformning och montering av jordningssystem för elektriska installationer.

SS-EN 60909-0: Kortslutningsströmmar i trefas växelströmsnät. Standarden är tillämplig för beräkning av kortslutningsströmmar i trefas växelströmsnät.

SS-EN 61000-2-2: Miljöförhållanden – Kompatibilitetsnivåer för lågfrekventa ledningsbundna störningar och signalnivåer på elnät. Observera att standarden anger kompatibilitetsnivåer för allmänna distributionsnät för lågspänning med en nominell spänning om högst 420 V enfas eller 690 V trefas.

SS-EN 61000-4-30: Elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) – Del 4–30: Mät- och provningsmetoder – Mätning av spänningsgodhet och elkvalitet.

SS-EN 61400-21: Vindkraftverk – Del 21: Mätning och bedömning av elkvalitet för nätanslutna aggregat. Standarden definierar och anger de storheter som ska bestämmas för att karakterisera elkvaliteten, beskriver mätmetoderna och ger metoder för att bedöma överensstämmelse med givna elkvalitetsfordringar.

SS-EN 61936-1: Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1 kV AC – Del 1: Allmänna fordringar.

SS-EN 62109-2: Omformare för solcellsanläggningar – Säkerhet – Del 2: Särskilda fordringar på växelriktare.

SS-EN 62920: Omriktare för solcellsanläggningar – EMC – Fordringar och provningsmetoder.

<sup>21</sup> [VFMP0115\\_Processbeskrivning.indd \(vattenfalleldistribution.se\)](#)

<sup>22</sup> [Anslutning till regionnät - eon.se](#)

<sup>23</sup> [Anslutning av större produktionsanläggningar till elnätet - ASP - Energiföretagen Sverige \(energiforetagen.se\)](#)

<sup>24</sup> EIFS 2019:7: Energimarknadsinspektionens föreskrifter om fastställande av krav på datautbyte mellan elnätsföretag och betydande nätanvändare

## 6.8 Rapporter och övriga vägledande dokument

Ett antal relevanta rapporter och andra vägledande dokument har identifierats.

### 6.8.1 ACER

ACER (European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators) har enligt artikel 60 i Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2019/943 av den 5 juni 2019 om den inre marknaden för el [16] uppmanats av EU-kommissionen att lämna ramriktlinjer för utarbetande av nätföreskrifter. Nedanstående rapport är ett viktigt vägledande dokument som syftar till att informera intressenter om områden där tillägg till nätföreskrifterna kan väntas.

- ACER POLICY PAPER on the revision of the network code on requirements for grid connection of generators and the network code on demand connection, 26 September 2022 [21]

Följande problemområden har definierats i rapporten:

- Krav för pumpkraftverk
- Fastställande av kraftparksmodulers betydelse
- Krav på blandade kundanläggningar (mixed customer sites, MCSs), aktiva kunder och energisammanslutningar<sup>25</sup>
- Betydande modernisering
- Tekniska krav för energilagring
- Elektromobilitet
- Simuleringsmodeller och övervakning av kravöverensstämmelse
- Avancerade möjligheter (egenskaper) för nät med hög andel förnyelsebara energikällor och omriktarbaserad effektinmatning
- Krav på generatorers motståndskraft mot väderrisker
- Krav på elanvändare som tillhandahåller stödtjänster
- Harmonisering av kraven för typ B, C och D kraftparksmoduler
- Förbättringar av tillämpliga regler och förfaranden
- Verifiering av kravöverensstämmelse

### 6.8.2 ENTSO-E

ENTSO-E (the European association for the cooperation of transmission system operators for electricity) gör studier och förarbeten för de europeiska regelverken, men tar även fram policy-dokument och annat underlag. På ENTSO-E:s hemsida finns många intressanta och vägledande dokument, såsom:

- Nordic Grid Code 2007<sup>26</sup>
  - Dokumentet innehåller bland annat planeringskriterier och prestandakrav på den samlade nordiska nätplaneringen. Det är osäkert vilken tyngd dokumentet har idag, men det innehåller ett väl genomarbetat material som ger vägledning i dimensioneringsfrågor.
- General Guidance on Compliance Verification – Compliance Testing and use of Equipment Certificates

<sup>25</sup> Aktiva kunder som förbrukar och lagrar energi inom sina eller intilliggande anläggningar blir allt vanligare. Andra former av aggregering är energisammanslutningar

<sup>26</sup> [070115 entsoe\\_nordic\\_NordicGridCode.pdf](https://www.entsoe.eu/nordic/NordicGridCode.pdf)

- o ENTSO-E vägledning för nationell implementering av nätkoder för nätanslutning – överensstämmelseprovning och tillämpning av utrustningscertifikat<sup>27</sup> i verifieringsprocessen.

I ENTSO-E:s vägledning [17] visas verifieringskraven för tester och simuleringar för att verifiera kravuppfyllnad enligt EU-förordningarna 2016/631 [8], 2016/1388 [18] och 2016/1447 [20] översiktligt i tabellform, se Tabell 3, Tabell 4, Tabell 5 och Tabell 6. I Tabell 6 förklaras förkortningar som används i Tabell 3, Tabell 4 och Tabell 5. För anslutning av produktion nära ett kärnkraftverk är kraftproduktionsmoduler av typ A och B inte aktuella; flertalet torde vara av typ D, men någon enstaka skulle kunna vara av typ C. Tabell 3, Tabell 4, Tabell 5 är uppbyggda på samma sätt, enligt följande:

- Tabellerna innehåller rekommendationer på hur överensstämmelse med kraven ska verifieras.
- Till vänster i Tabell 3, Tabell 4 och Tabell 5 anges var explicita krav är definierade i respektive EU-förordning.
- De fyra första kolumnerna för RfG samt tre första kolumnerna för HVDC och DCC anger vilket krav och vilka artiklar i respektive förordning som erfordrar bevis på överensstämmelse.
- De tre sista kolumnerna beskriver på vilket sätt överensstämmelse ska visas.
- För typ A och B rekommenderas utrustningscertifikat, men det är den berörda systemansvarige som avgör vilken metod som ägaren av kraftproduktionsmodulen ska använda.

**Tabell 3. EU-förordning 2016/631 nätkod för anslutning av generatorer, överensstämmelsetester och simuleringar**

EU 2016/631 RfG krav – verifiering av förmåga och överensstämmelse				Överensstämmelsebedömning baserat på utrustningscertifikat (EqC), tester (CVT) och simulering (CVS)		
RfG, Artikel Avdelning II Krav	Beskrivning av krav	PGM typ	RfG, Artikel Avdelning IV Överensstämmelse	EqC (minimikrav)		CVT / CVS PPM&SPGM
				PPM	SPGM	
13(2)	Begränsat frekvenskänslighetsläge – överfrekvens (LFSM-O)	≥A	44, 47, 51(1)(2), 54(2)	T for A; T&S for ≥B	T for A; T&S for ≥B	M (≥C)
15(2)(a)(b)	Aktiv effekt, reglerbarhet	≥C	48(2)	T	-	M
15(2)(e)	Reglering av frekvensåterställning*	≥C	45(4), 48(5)	Co(T)	Co(T)	Co
15(2)(d)	Frekvenskänslighetsläge (FSM)	≥C	45(3), 48(4), 51(3), 55(3)	T&S	T&S	M
15(2)(c)	Begränsat frekvenskänslighetsläge – underfrekvens (LFSM-U)	≥C	45(2), 48(3), 51(2), 55(2)	T&S	T&S	M
21(2)	Syntetisk tröghet under mycket snabba frekvensavvikelse*	≥C	55(5)	Co(S)	-	-
17(3), 20(3)	Återhämtning av aktiv effekt efter fel	≥B	51(4), 54(5)	S	S	-
14(3)	Förmåga till feltålighet < 110 kV	B	51(3)	S	S	-
		C	54(4)	S	S	-
16(3)	Förmåga till feltålighet ≥ 110 kV	D	53(3), 56(3)	S	S	-
15(5)(a)	Förmåga till dödnätsstart*	≥C	45(5)	-	Co(T)	Co
15(5)(b)	Förmåga att delta i ö-drift*	≥C	51(4)	-	S	Co
15(5)(c)	Förmåga till snabb återsynkronisering	≥C	45(6)	-	T	-
18(2)(b)	Förmåga till reaktiv effekt vid maximal kontinuerlig effekt	≥C	45(7), 51(5)	-	T&S	M
18(2)(c)	Förmåga till reaktiv effekt lägre än den maximala kontinuerliga effekten	≥C	45(7), 51(5)	-	T&S	M
19(2), 21(3)(f)	Dämpningsreglering av effektpendlingar*	D	55(7)	Co(S)	Co(S)	Co
20(2)(b), (c)	Tillhandahållande av snabb felström*	≥B	54(3)	Co(S)	-	-
21(3)(b)	Förmåga till reaktiv effekt vid maximal kontinuerlig effekt	≥C	48(6), 55(6)	T&S	-	M
21(3)(c)	Förmåga till reaktiv effekt lägre än den maximala kontinuerliga effekten	≥C	48(6), 55(6)	T&S	-	M
21(3)(d)	Reglerlägen för reaktiv effekt	≥C	48(7), 48(8), 48(9)	T	-	M

<sup>27</sup> Utrustningscertifikat, ett dokument som utfärdas av ett behörigt certifieringsorgan för utrustning som används i en kraftproduktionsmodul, i en förbrukningsenhet, i ett distributionssystem, i en förbrukningsanläggning eller i ett system för högspänd likström, se [8]

**Tabell 4. EU-förordning 2016/1447 nätkod för anslutning av system för högspänd likström och likströmsanslutna kraftparksmoduler, överensstämmelsetester och simuleringar**

EU 2016/1447 HVDC - Krav – verifiering av kapacitet och överensstämmelse			Överensstämmelsebedömning assessment baserat på utrustningscertifikat (EqC), tester (CVT) och simulering (CVS)	
Artikel Avdelning II & III Krav	Beskrivning av krav	Artikel Avdelning VI Överensstämmelse	EqC (minimikrav)	CVT/CVS
			DC ansluten - PPM	HVDC
69	Roller och ansvarsområden	69	-	-
57, 70(3)(f), 70(3)(g)	Villkor och förfaranden för att utnyttja utrustningscertifikat	70(3)	-	-
13(1)(a), 13(1)(d), 41, 48(3) i RfG 2016/631	Aktiv effekt, reglerbarhet	71(9), 72(10)	T	M
20, 48	Förmåga till reaktiv effekt	71(4), 72(2), 72(3)	T	M
21(3) i RfG 2016/631	Reglerläge för effektfaktor	71(5), 72(6)	T	M
22(3), 22(4), 22(5), 40, 48	Reglerläge för spänning	71(5), 72(4)	T	M
Artikel 48(4) i RfG 2016/631	FSM-svar (Frekvenskänslighetsläge)	71(6), 72(11)	T	M
Artikel 47.3 i RfG 2016/631	LFSM-O-svar (Begränsat frekvenskänslighetsläge – överfrekvens)	71(7), 72(8)	T	M
Artikel 48.3 i RfG 2016/631	LFSM-U-svar (Begränsat frekvenskänslighetsläge – underfrekvens)	71(8), 72(9)	T	M
Artikel 45.5 i RfG 2016/631	Reglering av frekvensåterställning	72(12)	T&S	M
13.2	Ramphastigheter	71(10)	T&S	M
37	Förmåga till dödnätsstart*	71(11)	-	Co(T)
39 Artikel 13, 15 i RfG 2016/631	Frekvensstabilitet - frekvensvarskrav	72(12)	-	M
44	Elkvalitet	NR	-	NR

**Tabell 5. EU-förordning 2016/1388 nätkod för anslutning av förbrukare, överensstämmelsetester och simuleringar**

EU 2016/1388 DCC - Krav – verifiering av kapacitet och överensstämmelse			Överensstämmelsebedömning assessment baserat på utrustningscertifikat (EqC), tester (CVT) och simulering (CVS)	
Artikel Avdelning II Krav	Beskrivning av krav	Artikel Avdelning IV Överensstämmelse	EqC (minimikrav)	CVT/CVS
			Utrustning Komponenter	
12	Allmänna frekvenskrav	36 (1)	T	M
13	Allmänna spänningskrav	36 (1)	T	M
19	Bortkoppling av förbrukning och återinkoppling av förbrukning	37(1)	T	M (T)
18(3)	Informationsutbytet av nätanslutna förbrukningsanläggningar	38(1)	T	M (T)
19	Bortkoppling av förbrukning och återinkoppling av förbrukning	39(1)	T	M (T)
18(3)	Informationsutbytet av nätanslutna förbrukningsanläggningar	40(1)	T	M (T)
15	Reaktiv effekt - Överensstämmelse-simulering	43.1(c)	-	M (S)
15(3)	Aktiv reglering av reaktiv effekt	43.2	-	M (S)
15(1), 15(2)	Förmåga till reaktiv effekt	44(1)(c), 41(2)(c)	-	M (S)
28(2)(a), 12(1), (2)	Drift inom angivna frekvensområden	NR	-	-
28(2)(k)	Ej kopplas bort från systemet på grund av frekvensändringshastigheten (RoCoF)	NR	-	-
28(2)(b)(c)	Drift inom de spänningsintervall som anges i artikel 13, standarder, artikel 6 och artikel 9(1)	NR	-	-
28(2)(d)(f)(g)(h), 28(l)	Anpassning av effektförbrukning	41 (1)	T	M (T)
28 (3)	Bortkoppling eller återinkoppling av statiska kompenseringssystem	41 (2)	T	M (T)
29(2)(a)	Drift inom angivna frekvensområden som anges i artikel 12(1) och det utökade området i artikel 12(2)	NR	-	Co
29(2)(b)	Drift inom de spänningsintervall som anges i artikel 13, standarder, artikel 6 och artikel 9(1)	NR	-	-
30	Förbrukningsenheter med efterfrågeflexibilitet för mycket snabb reglering av aktiv effekt	45 (1), (2)	-	M (S)

**Tabell 6. Förkortningar använda i Tabell 3, Tabell 4 och Tabell 5**

Förkortningar	
-	Ej tillämplig
*	Icke-obligatorisk förmåga
Co	Villkorligt – om funktionen finns eller krävs av systemoperatören
CVS	Överensstämmelsesimulering för att komplettera utrustningscertifikat
CVT	Överensstämmelsetest för att komplettera utrustningscertifikat
EqC	Utrustningscertifikat - baserat på simuleringar och tester
M	Obligatorisk förmåga verifieras genom test och/eller simulering
NR	Nationellt för överensstämmelseverifikation - Rekommenderat att inkluderas i medlemslandets regler
O	Valfritt – EqC kan användas istället för några av testerna
S	EqC baserat på simuleringar
T	EqC baserat på tester
T&S	EqC baserat på tester och simuleringar
PGM	Kraftproduktionsmodul; antingen en synkron kraftproduktionsmodul eller en kraftparksmodul
PPM	Kraftparksmodul, en eller flera elproduktionsenheter som antingen är asynkront anslutna till nätet eller anslutna via kraftelektronik, och som dessutom har en enda anslutningspunkt
SPGM	Synkron kraftproduktionsmodul, en odelbar uppsättning av apparater som kan generera elektrisk energi synkront med nätspänningens frekvens

### 6.8.3 IRENA

IRENA (International Renewable Energy Agency) är en global mellanstatlig organisation för energiomställningen och en plattform för internationellt samarbete på området. IRENA har publicerat en rapport som beskriver utvecklingen och praxis för att utveckla nätkoder för kraftsystem med hög andel variabel förnybar energi (VRE) som solenergi och vindkraft.

- IRENA (2022), Grid codes for renewable powered systems, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi [19]

## 7 REKOMMENDATIONER

- 1) Det rekommenderas att föreliggande rapport görs tillgänglig för branschen i stort, men främst för Svenska kraftnät och andra anslutande elnätföretag samt för producenter som planerar anslutning i närheten av ett befintligt kärnkraftverk.
- 2) Det rekommenderas att kärnkraftverken i samtliga anslutningspunkter, såväl för kraftutmatning som för hjälpkraftinmatning, snarast sätter upp mätutrustning för registrering av elkvalitet. Materialet kommer att bli en unik referens för förhållandena före anslutningen av den närliggande omriktaranslutna produktionen.
- 3) Det rekommenderas att kärnkraftverken i samtliga anslutningspunkter, såväl för kraftutmatning som för hjälpkraftinmatning, snarast sätter upp PMU<sup>28</sup>:er för kontinuerlig registrering av stamnätshändelser. Materialet kommer att bli en unik referens, dels för diskussioner med Svenska kraftnät och den lokale nätägaren om händelser i nätet, dels för förhållandena före anslutningen av den närliggande omriktaranslutna produktionen.
- 4) Det rekommenderas att kärnkraftverken bevakar inkomna anslutningsansökningar till Svenska kraftnät.
- 5) Det rekommenderas att kärnkraftverken bevakar inkomna anslutningsansökningar till regionnätssinnehavaren för respektive regionnät.
- 6) Det rekommenderas, med stöd av SSMFS 2021:4, 3 kap. 2 §<sup>29</sup>, att kärnkraftverken kontinuerligt bevakar inkomna anslutningsansökningar till Svenska kraftnät, som rör *stamnätanslutningar* i närheten av befintliga kärnkraftverk och säkerställer att kärnkraftverken, i sin egenskap av "betydande nätanvändare", är med i dialogen om den tillkommande anslutningen i inledningskedet, men även under processens gång fram till färdig anslutning.
- 7) Det rekommenderas, med stöd av SSMFS 2021:4, 3 kap. 2 §, att kärnkraftverken kontinuerligt bevakar inkomna anslutningsansökningar till regionnätssinnehavaren av respektive startnätet, som rör *regionnätanslutning* i närheten av befintliga kärnkraftverk och säkerställer att kärnkraftverken, i sin egenskap av "betydande nätanvändare", är med i dialogen om den tillkommande anslutningen i inledningskedet, men även under processens gång fram till färdig anslutning.
- 8) Det rekommenderas, med stöd av SSMFS 2021:4, 3 kap. 2 §, att alla parter som på ett eller annat sätt är delaktiga i nyetablering av produktion nära ett befintligt kärnkraftverk delges föreliggande rapport, tillsammans med ett lämpligt formulerat budskap om att dokumentets betydelse svårligen kan överskattas.
- 9) Det rekommenderas, med stöd av SSMFS 2021:4, 3 kap. 2 §, att kärnkraftverken i sin egenskap av berörd betydande nätanvändare följer upp att de tester, verifikationer och studier, som regelverket kräver, verkligen blir gjorda och att resultaten är tillfredsställande, i samband med nyanslutning av närliggande produktion, oberoende av om denna uppföljning görs av berörd nätägare (DSO/Svenska kraftnät) eller inte.

<sup>28</sup> PMU = Phasor Measurement Unit = GPS-synkroniserad mätenhet för strömmar och spänningar, som även ger fasvinklar i kraftsystemet.

<sup>29</sup> Ur vägledningstexten: "I enlighet med 3 kap. 2 § om samverkan vid genomförande av konstruktionsarbete medför detta ett ansvar att samverka med berörda externa parter, i detta fall parter som ansvarar för det yttre nätet. Det kan bl.a. innebära att påverka förutsättningarna genom att aktivt delta i samråd kring utformning av det yttre nätet." och "Vidare behövs kärnkraftsreaktorns intressen vid eventuella ändringar av extern kraftförsörjning bevakas, exempelvis vid samråd om ny linjedragning av externt nät"

## REFERENSER

- [1] Ellagen [Ellag \(1997:857\) Svensk författningssamling 1997:1997:857 t.o.m. SFS 2022:596 - Riksdagen](#)
- [2] Elsäkerhetslagen [Elsäkerhetslag \(2016:732\) Svensk författningssamling 2016:2016:732 t.o.m. SFS 2022:1135 - Riksdagen](#)
- [3] Svenska kraftnät, Uppdrag att förbereda utbyggnad av transmissionsnätet till områden inom Seriges sjöterritorium, SvK 2021/4349, 2022-06-15. [Uppdrag att förbereda utbyggnad av transmissionsnät till områden inom Sveriges sjöterritorium \(svk.se\)](#)
- [4] [Vindbrukskollen \(lansstyrelsen.se\)](#)
- [5] [Map\\_Northern-Europe-3.000.000.pdf \(entsoe.eu\)](#)
- [6] Analysgruppen vid kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (KSU), Forsmarksincidenten den 25 juli 2006, Bakgrund Nummer 5, December 2006, Årgång 19, ISSN 1101-5268. [Bkgr5-06 Forsmark Swe Rev -07.pmd \(analys.se\)](#)
- [7] Final DIDELSYS Task Group Report, Defence in Depth of Electrical Systems and Grid Interaction, Nuclear Energy Agency, NEA/CSNI/R(2009)10, 09 Nov 2009. [Nuclear Energy Agency \(NEA\) - Defence in Depth of Electrical Systems and Grid Interaction: Final DIDELSYS Task Group Report \(oecd-nea.org\)](#)
- [8] Kommissionens förordning (EU) 2016/631 av den 14 april 2016 om fastställande av nätföreskrifter med krav för nätanslutning av generatorer (sv). [EUR-Lex - 32016R0631 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\) https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0631](#)
- [9] Energimarknadsinspektionens föreskrifter om fastställande av generellt tillämpliga krav för nätanslutning av generatorer. [Energimarknadsinspektionens föreskrifter om fastställande av generellt tillämpliga krav för nätanslutning av generatorer \(ei.se\)](#)
- [10] Cigre, HVDC Connection of Offshore Power Plants, WG B4.55, May 2015 [e-cigre > Publication > Integration of large scale wind generation using HVDC and power electronics](#)
- [11] Svenska kraftnät, Vägledning för anslutning till Stamnätet, Version 1:0, 2021-12-01. [Vägledning för anslutning till Stamnätet. \(svk.se\)](#)
- [12] IAEA Safety Standards, Design of Electrical Power Systems for Nuclear Plants, No. SSG-34. [Design of electrical power systems for nuclear power plants \(iaea.org\)](#)
- [13] Ofgem, Technical Report on the events of 9 August 2019, 6 September 2019 [National Grid ESO LFDD 09/08/2019 Incident Report \(ofgem.gov.uk\)](#)
- [14] ENTSO-E, HVDC Utilization and Unavailability Statistics 2021, 16 August 2022 [2021\\_ENTSO\\_E\\_HVDC\\_Utilisation\\_and\\_Unavailability\\_Statistics.pdf \(entsoe.eu\)](#)
- [15] UCTE, System Disturbance on 4 November 2006, Final Report [Microsoft Word - IC-Final-Report-20070129-v13.doc \(entsoe.eu\)](#)
- [16] Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2019/943 av den 5 juni 2019 om den inre marknaden för el. [EUR-Lex - 02019R0943-20220623 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)
- [17] General Guidance on Compliance Verification – Compliance Testing and use of Equipment Certificates, 30 July 2021 [GENERAL GUIDANCE ON COMPLIANCE VERIFICATION - Compliance testing and application of equipment certificates in the verification process \(entsoe.eu\)](#)

- [18] Kommissionens förordning (EU) 2016/1388 av den 17 augusti 2016 om fastställande av nätföreskrifter för anslutning av förbrukare. [EUR-Lex - 32016R1388 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)
- [19] Grid codes for renewable powered systems, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022, Abu Dhabi. [Grid codes for renewable powered systems \(irena.org\)](#)
- [20] KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) 2016/1447 av den 26 augusti 2016 om fastställande av nätföreskrifter med krav för nätanslutning av system för högspänd likström och likströmsanslutna kraftparksmoduler. [EUR-Lex - 32016R1447 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)
- [21] ACER POLICY PAPER on the revision of the network code on requirements for grid connection of generators and the network code on demand connection, 26 September 2022 [260908 ACER GCNCs Policy Paper\\_final.pdf \(europa.eu\)](#)
- [22] KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) 2017/1485 av den 2 augusti 2017 om fastställande av riktlinjer för driften av elöverföringssystem [CL2017R1485SV0010010.0001.3bi\\_cp 1..1 \(europa.eu\)](#)
- [23] SSMFS 2021:4: Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om konstruktion av kärnkraftsreaktorer, [SSMFS 2021-4 Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om konstruktion av kärnkraftsreaktorer \(stralsakerhetsmyndigheten.se\)](#)
- [24] SSMFS 2021:5: Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om värdering och redovisning av strålsäkerhet för kärnkraftsreaktorer [SSMFS 2021:5 Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om värdering och redovisning av strålsäkerhet för kärnkraftsreaktorer - Strålsäkerhetsmyndigheten \(stralsakerhetsmyndigheten.se\)](#)
- [25] SSMFS 2021:6: Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om drift av kärnkraftsreaktorer, [SSMFS 2021:6 Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om drift av kärnkraftsreaktorer - Strålsäkerhetsmyndigheten \(stralsakerhetsmyndigheten.se\)](#)
- [26] SvKFS 2005:2: Affärsverket svenska kraftnäts föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar, 9 december 2005 [SvKFS2](#)
- [27] NEA: Robustness of Electrical Systems of Nuclear Power Plants in Light of the Fukushima Daiichi Accident (ROBELSYS): Workshop Proceedings, Nuclear Energy Agency, March 2015 [Nuclear Energy Agency \(NEA\) - Robustness of Electrical Systems of Nuclear Power Plants in Light of the Fukushima Daiichi Accident \(ROBELSYS\): Workshop Proceedings \(oecd-nea.org\)](#)
- [28] NEA: Robustness of Electrical Systems of Nuclear Power Plants in Light of the Fukushima Daiichi Accident (ROBELSYS): Workshop Proceedings [Appendix 2 (Cont'd) and Appendix 3], Nuclear Energy Agency, March 2015 [Nuclear Energy Agency \(NEA\) - Robustness of Electrical Systems of Nuclear Power Plants in Light of the Fukushima Daiichi Accident: ROBELSYS Workshop Proceedings \[Appendix 2 \(Cont'd\) and Appendix 3\] \(oecd-nea.org\)](#)







## Om DNV

DNV är en ledande global leverantör av tekniska och kommersiella rådgivningstjänster inom energisektorn. Företaget arbetar med aktörer längs hela värdekedjan med projekt inom bland annat produktion, transmission, distribution, lagring och förbrukning. DNV har med sina mer än 4000 globala energiexperter, en världsledande kompetens inom flertalet områden, däribland inom kraftsystem. Företaget anlitas regelbundet av bland annat myndigheter, nätbolag och teknikleverantörer för att lösa de mest utmanande frågeställningarna inom detta område.