

KÄRNKRAFTENS ROLL I KRAFTSYSTEMET

Möjligheter och begränsningar vid förändrad kärnkraftproduktion



SVENSKA KRAFTNÄT

Svenska kraftnät är ett statligt affärsverk med uppgift att förvalta Sveriges stamnät för el, som omfattar ledningar för 400 kV och 220 kV med stationer och utlandsförbindelser. Vi har också systemansvaret för el. Vi utvecklar stamnätet och elmarknaden för att möta samhällets behov av en säker, hållbar och ekonomisk elförsörjning. Därmed har Svenska kraftnät också en viktig roll i klimatpolitiken.

Rapporten är skriven av Maja Lundback på Svenska kraftnät.
Illustrationer och kartor har tagits fram av Svenska kraftnät.
Foto omslag: Tomas Årlemo.
Pressbilder från: Vattenfall AB. OKG Aktiebolag.

Org. Nr 202 100-4284

SVENSKA KRAFTNÄT
Box 1200
172 24 Sundbyberg
Sturegatan 1

Tel 010-475 80 00
Fax 010-475 89 50

www.svk.se



Förord

I Systemutvecklingsplan 2018-2027 beskrev Svenska kraftnät de stora förändringar som kraftsystemet nu genomgår och de utmaningar som introduktionen av förnybar väderberoende produktion innebär. Denna introduktion har två, för kraftsystemet, avgörande konsekvenser; den ersätter den befintliga planerbara produktionen och den görs utan den tidigare koordineringen, varken med utbyggnaden av nätet eller genom att kraftsystemets funktion och behov av stabilitet beaktas.

Det är Svenska kraftnäts ansvar som systemansvarig myndighet att upprätthålla kraftsystemets stabilitet och anskaffa sådana funktioner som gör det möjligt. För att kunna säkerställa att kraftsystemet får de stabiliserande egenskaper som krävs behöver alla stenar vändas på och tänkbara åtgärder analyseras för att hitta de bästa lösningarna ur ett tekniskt och ekonomiskt perspektiv. Det krävs också en bra dialog och ett fördjupat samarbete med aktörerna i branschen. Grundläggande kunskap och förståelse för varandras verksamheter är en förutsättning för att kunna uppnå samarbete och utveckla den tekniska samverkan mellan Svenska kraftnät och övriga aktörer i kraftsystemet.

Denna rapport är ett uttryck för ett sådant fördjupat samarbete för att öka förståelsen mellan aktörerna och tydliggöra kärnkraftsanläggningarnas möjligheter och begränsningar för att de i framtidens kraftsystem ska kunna bidra med ökad flexibilitet så att kraftsystemets stabilitet förbättras.

Rapporten har gjorts med medverkan av OKG Aktiebolag, Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, Fortum Sverige AB, Vattenfall AB, Uniper och Strålsäkerhetsmyndigheten. Samtliga har deltagit i workshops, bidragit med underlag till rapporten och haft möjlighet att kommentera denna rapport.

Ulf Moberg
Teknisk direktör

Maja Lundbäck
Förändringsledare för
systemansvars- och tillsynsverksamheten



Sammanfattning

Svenska kraftsystemet genomgår stora förändringar. I systemutvecklingsplanen för 2018-2027 presenterar Svenska kraftnät vilka systemutmaningar dessa förändringar medför. I samtliga analyser och prognoser gjorda av Svenska kraftnät är det stora förändringar i framförallt södra Sverige. Dessa förändringar beror på bland annat införande av väderberoende produktion, men även förändringar i av svenska kärnkraftsanläggningar och ändrade effektlöden i kraftsystemet.

Kärnkraftsanläggningarna i Sverige utgör en betydande del av kraftproduktionsapparaten och påverkar kraftsystemets driftsäkerhet och leveranssäkerhet. Kärnkraftsanläggningarnas roll i kraftsystemet har varit en fråga som diskuterats till och från under de senaste 40 åren, men nu står kraftsystemet inför det faktum att flera kärnkraftsanläggningar har tagits och kommer att tas ur drift utan att ersättas med annan planerbar kraftproduktion. För att få förståelse från kraftsystemets aktörer om vilka åtgärder som kommer att behöva vidtas finns det ett behov av att beskriva kärnkraftens nuvarande roll i kraftsystemet, men även att förtydliga vilken påverkan färre kärnkraftsanläggningar kommer ha på kraftsystemets driftsäkerhet och även på de kvarvarande kärnkraftsanläggningarna.

Denna utredning har gjort en första ansats till att beskriva förändringarna och förmedla den komplexitet som finns inbyggd i kraftsystemet. Utredningen fokuserar på att redogöra för förutsättningarna och de förhållanden som finns mellan kraftsystemets stabilitet och tillräcklighet och kärnkraftsanläggningarnas förmåga att leverera kraft i det nya kraftsystem som är under framväxt.

Kraftsystemets leveranssäkerhet är beroende av tillräckligt bra stabilitet (tillförlitlighet) men även att effekt (tillräckligheten) finns i rätt omfattning och speglar samhällets behov av kraft. Det är viktigt att inse att de fysikaliska egenskaperna som styr stabiliteten och effekten går hand i hand. Kärnkraftsanläggningarnas bidrag till kraftsystemet är mer än leverans av effekt och energi. De bidrar med egenskaper som påverkar kraftsystemets tillförlitlighet så som:

- > Frekvensstabilitet
- > Spänningsstabilitet
- > Rotorvinkelstabilitet

Vidare är kärnkraftsanläggningarnas geografiska placering viktig då de jämnar ut effektlöden och gör att överföring av kraft från norr till söder i Sverige kan ske effektivt i och med de stabiliserande bidragen. Kärnkraftsanläggningarna,

tillsammans med vissa HVDC-kablar, är de största aktörerna i kraftsystemet vilket gör att de påverkar mängden reserver som måste finnas i kraftsystemet för att klara om någon av de största aktörerna skulle kopplas bort.

Kärnkraftsanläggningarna konstruerades för att köras i ett stabilt kraftsystem. Detta gör att kärnkraftsanläggningarnas produktionsförmåga och delar av djupförsvaret påverkas av de stabiliserande egenskaperna som kärnkraftsanläggningarna själva är en del av att bidra med till kraftsystemet. I och med nedläggning av kärnkraftsanläggningar blir de färre i antal som bidrar med dessa stabiliserande egenskaper. Det medför att de kvarvarande kärnkraftsanläggningarna får en större påverkan på kraftsystemets driftsäkerhet och även sin egen produktionsmiljö.

Den omställning som nu pågår är större än då kärnkraftsanläggningarna en gång anslöts till systemet. En teknisk grundläggande förståelse för varandras verksamheter för att kunna bedöma och avgöra vilka åtgärder som kan vidtas beaktat de olika aktörernas verksamheter är således en framgångsfaktor för att säkerställa ett stabilt och driftsäkert kraftsystem.

Svenska kraftnät har som systemansvarig myndighet ett ansvar att tydliggöra kraftsystemets utveckling och ge förutsättningar och incitament för systemets aktörer att vidta de åtgärder som krävs för att kraftsystemet fortsatt vara tillförlitligt och samverka driftsäkert. En tydlig beskrivning av kärnkraftsanläggningarnas bidrag och påverkan ger en bättre förutsättning för Svenska kraftnät att utöva systemansvaret och anskaffa tjänster och åtgärder som krävs för att hantera nya fenomen i kraftsystemet som uppstår i och med omställningen av kraftsystemet med ökad andel väderberoende ej synkront ansluten kraftproduktion.

För att behålla kraftsystemets stabilitet behöver förändringar vidtas. Kärnkraftsanläggningarna har teknisk förmåga som inte fullt ut används idag avseende reglering av aktiv och reaktiv effekt. De skulle kunna bidra med mer flexibilitet i kraftsystemet.

Aktiv effekt

Kokvattenreaktorer har möjlighet till utökad användning av effektregering och frekvensreglering. Vissa anläggningar har även teknisk möjlighet att bidra med kontinuerlig frekvensreglering och även en mindre variant av snabb effektökning vid frekvensstörningar i kraftsystemet. Tryckvattenreaktorer har möjlighet att bidra med effektregering och till viss del även frekvensreglering. Frekvensreglering har inte tidigare tillämpats i Sverige och behöver analyseras innan eventuell aktivering.

Dessa egenskaper skulle bidra till kraftsystemets frekvensstabilitet och balansering.

Reaktiv effekt

I samtliga kärnkraftsanläggningar finns förmåga till kontinuerlig konsumtion och produktion av reaktiv effekt. Regleringen kan ske både automatisk och manuellt. Kärnkraftsanläggningarna bidrar idag med en dynamisk spänningsreglering. Men den totala förmågan (kapabiliteten) används inte idag utan användandet skulle kunna utökas och utvecklas med rätt incitament. Dämpningsbidrag och reaktiva resurser kan utnyttjas effektivare genom samplanering och därmed erhålla bättre spänningsstabilitet vid störningar i stamnätet samt jämna ut pendlingar i kraftsystemet effektivare.

Att nyttja dessa egenskaper på ett bättre sätt skulle stötta kraftsystemets rotorvinkelstabilitet och spänningsstabilitet.

Det behöver klarställas hur eventuella förändringar kan användas och anskaffas av Svenska kraftnät. Ändringar som riskerar att försämra en stabil drift av kärnkraftsanläggningarna gynnar inte någon part. Att eventuellt ändra kärnkraftverks spänningsreglering av huvudgeneratoren eller aktiv effekterreglering är ett långsiktigt arbete där förståelse för både kraftsystemets behov och kärnkraftsanläggningarnas regelverk, förutsättningar och tillståndspliktig verksamhet måste beaktas och tas hänsyn till.

Innehåll

Sammanfattning	5
Inledning	10
Syfte med utredningen	12
<i>Omfattning och avgränsning</i>	<i>12</i>
<i>Rapportens upplägg</i>	<i>14</i>
<i>Kort beskrivning av aktörers roller och ansvar</i>	<i>14</i>
<i>Kärnkraftsanläggningar</i>	<i>15</i>
<i>Strålsäkerhetsmyndigheten</i>	<i>16</i>
<i>Affärsverket svenska kraftnät</i>	<i>17</i>
 Del 1 – Kärnkraftsanläggningarnas bidrag till driftsäkerheten och leveranssäkerheten	 20
<i>Kraftsystemet – elektrifiering av Sverige</i>	<i>20</i>
<i>Kraftsystemets stabilitet – en förutsättning för säker drift</i>	<i>21</i>
<i>Frekvensstabilitet</i>	<i>21</i>
<i>Rotorvinkelstabilitet</i>	<i>23</i>
<i>Spänningsstabilitet</i>	<i>24</i>
<i>Stabil drift – en förutsättning för en väl fungerande elmarknad</i>	<i>25</i>
<i>Ett tillräckligt driftsäkert kraftsystem – marginaler för en säker drift</i>	<i>25</i>
<i>Drift av kraftsystemet</i>	<i>27</i>
<i>Systemansvarig – samordning av ett driftsäkert kraftsystem</i>	<i>29</i>
<i>Anskaffandet av tjänster och åtgärder</i>	<i>29</i>
<i>Sammanfattning av kärnkraftsanläggningarnas påverkan på kraftsystemets stabilitet och drift</i>	<i>31</i>
 Del 2 - Kärnkraftsanläggningarnas behov av ett stabilt kraftsystem	 34
<i>Kärnkraftsanläggningarnas utveckling – i samklang med kraftsystemet</i>	<i>34</i>
<i>Kärnkraftsanläggningarnas interna elkraftsystems roll för en stabil drift av kärnkraftsanläggningarna</i>	<i>35</i>

<i>Drift- och dimensioneringsförutsättningar för en driftsäker samverkan med kraftsystemet</i>	<i>38</i>
<i>Sammanfattning av kärnkraftsanläggningarnas samverkan med kraftsystemet</i>	<i>40</i>
 Del 3 – Förutsättningar för en mer flexibel drift	 42
<i>Kraftsystemet, flexibilitet och marknadsmässigt utformade stödtjänster</i>	<i>42</i>
<i>Kärnkraftsanläggningarna och flexibilitet</i>	<i>45</i>
<i>Aktiv effektreglering av kärnkraftsanläggningar av lättvattenreakortyp</i>	<i>46</i>
<i>Tryckvattenreaktor (PWR) – Ringhals 3 och 4.....</i>	<i>47</i>
<i>Kokvattenreaktorer (BWR) – Forsmark 1, 2 och 3, Oskarshamn 3</i>	<i>48</i>
<i>Förutsättningar för flexibilitet och en erforderlig strålsäkerhet.....</i>	<i>50</i>
<i>Sammanfattning flexibilitet.....</i>	<i>51</i>
 Slutsatser	 54
<i>Kärnkraftens nya roll i omställningen av kraftsystemet</i>	<i>54</i>
<i>Systemutmaningarna och kärnkraftsanläggningarna.....</i>	<i>55</i>
<i>Tydliga roller och ansvar</i>	<i>56</i>
<i>Systemnytta och förståelse för kraftsystemets tekniska driftförutsättningar</i>	<i>57</i>
<i>Slutord</i>	<i>58</i>
 Revisionshistorik	 59
 Ordlista	 60

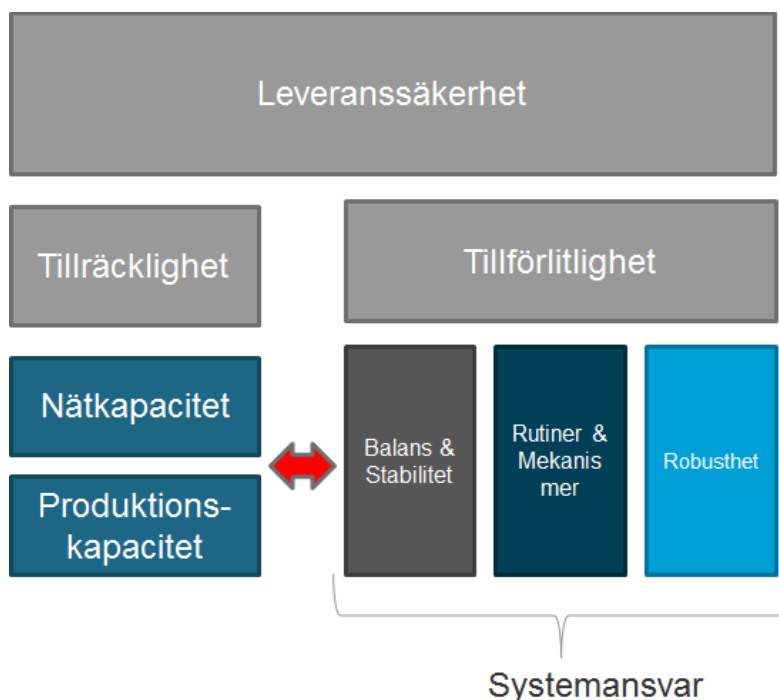


Inledning

Elkraftsystemet är centralt för hela det svenska samhällets funktion. Samhällets utveckling går dessutom mot ett allt större elberoende, där användning av el under dygnets alla timmar i princip är ett måste för att ge grundläggande förutsättningar till medborgare och företag att kunna leva och aktivt verka inom landet. Kravet på att alltid ha tillgång till stabil elförsörjning blir alltmer en paradox då det finns ett antal systemutmaningar som minskar hela kraftsystemets leveranssäkerhet, och därmed i förlängningen tillgången på stabil elenergi om inte åtgärder vidtas i närtid. Systemutmaningarna har Svenska kraftnät presenterat bland annat i Systemutvecklingsplan 2018-2027¹.

Elsystemet kan förenklat delas in i tre delar; produktion, överföring och förbrukning. Dessa tre delar måste fungera synkroniserat med varandra för att kraftsystemet ska kunna upprätthålla sin funktion och försörja förbrukare med elkraft. Hur väl kraftsystemet upprätthåller sin funktion brukar benämnas som systemets leveranssäkerhet.

¹ Affärsverket svenska kraftnät, "Systemutvecklingsplanen 2018 -2027 - mot ett flexibelt kraftsystem i en föränderlig omvärld," Sundbyberg, 2017.



Figur 1 Beskrivning av vilka delar som ingår i kraftsystemets leveranssäkerhet och vilka delar som ingår i systemansvaret, vilket Svenska kraftnät ansvarar för.

I figur 1 beskrivs vilka delar som ingår i begreppet leveranssäkerhet uppdelad efter tillräcklighet (kapacitet) och tillförlitlighet. Systemansvaret som Svenska kraftnät innehar rör kraftsystemets tillförlitlighet. Svenska kraftnät är innehavare av det nationella stamnätet vilket gör att Affärsverket även ansvarar för nätkapaciteten på 400 och 220 kV nivån i Sverige.

Kraftsystemet måste ha rätt fysikaliska förutsättningar för att systemet ska kunna fungera på ett driftsäkert sätt. Att kraftsystemet och kraftproducenter är fysikaliskt kompatibla med varandra, vid såväl normala som störda förhållanden, är avgörande för systemets förmåga att helt eller delvis upprätthålla elleveranserna inom de fastslagna systemdrifttillstånden (se 3, sid 27). Ett tekniskt välfungerande system är en förutsättning för att tillgängliggöra maximalt med energi till marknaden till minsta möjliga kostnad. Tillgången på stabil elkraft till konkurrenskraftiga priser är en förutsättning för ett lands utveckling².

Förändringarna i kraftsystemet som pågår innebär stora utmaningar. Dessa systemutmaningar som Svenska kraftnät har beskrivit³ förändrar de fysikaliska

² Närings- och teknikutvecklingsverket, "B 1991:6 Elmarknad i förändring, från monopol till konkurrens," Närings- och teknikutvecklingsverket, Stockholm, 1991.

³ Affärsverket svenska kraftnät, "Systemutvecklingsplanen 2018 -2027 - mot ett flexibelt kraftsystem i en föränderlig omvärld," Sundbyberg, 2017.

förutsättningarna i kraftsystemet, och således även drift- och produktionsmiljön för kraftproducenter. Då kärnkraftsanläggningarna är en central del av kraftsystemet och anslöts till kraftsystemet med en koordinerad utbyggnad av nätet måste hänsyn tas till de konsekvenser som systemutmaningarna medför. För att kunna göra detta ur ett helhetsperspektiv ska berörda aktörer involveras då de har ansvaret för säker drift, men även den bästa kunskapen om sina anläggningar.

Som systemansvarig har Svenska kraftnät ett ansvar att anskaffa tjänster som behövs för det övergripande systemansvaret för ett driftsäkert kraftsystem. Detta ska göras på ett öppet, icke-diskriminerande och marknadsmässigt sätt⁴ ⁵. För att minimera kostnader i systemet ska Svenska kraftnät söka breda lösningar med samtliga aktörer inom kraftsystemet⁵. Ska det lyckas måste aktörer i kraftsystemet informeras och en gemensam bild över kraftsystemets förutsättningar tas fram för att säkerställa att alla aktörer och intressenter, förstår vilken roll och vilken påverkan de har på kraftsystemets egenskaper. Det är således av vikt att bryta ner och förtydliga betydelsen av systemutmaningarna för kraftsystemets olika aktörer då konsekvenser, risker och möjligheter ser olika ut för olika produktionsslag. Vattenkraft, vindkraft och kärnkraft har sina respektive möjligheter och begränsningar.

Syfte med utredningen

Syftet med utredningen är att kartlägga och tydliggöra vilka möjligheter, begränsningar samt gemensamma intressen som rör kärnkraftsanläggningarnas förmåga till både stabil kraftproduktion och flexibel drift för att kunna bidra till kraftsystemets driftsäkerhet. En stabil kärnkraftsproduktion är en förutsättning för leverans av stödtjänster.⁶

Att dokumentera och ta fram en gemensam bild över kraftsystemets förutsättningar är avgörande för att säkerställa förståelsen för vilken roll och vilken påverkan kärnkraftsanläggningarna har på kraftsystemets egenskaper. Att bryta ner och förtydliga betydelsen av systemutmaningarna till kärnkraftindustrin och ansvarig tillsynsmyndighet är en förutsättning så hänsyn till konsekvenser, risker och möjligheter som systemutmaningarna medför kan tas.

Omfattning och avgränsning

Denna utredning begränsar sig till kärnkraftens roll i kraftsystemet. Från samtliga analyser gjorda av Svenska kraftnät framgår det att största utmaningarna för

⁴ Ellagen (1997:857), 1997.

⁵ Kommissionens förordning (EU) 2017/1485 av den 2 augusti 2017 om fastställande av riktlinjer för driften av elöverföringssystem, 2017.

⁶ Affärsverket svenska kraftnät, Utredningsdirektiv: Möjligheter och begränsningar vid förändrad kärnkraftproduktion i svenska elkraftsystemet, Sundbyberg, 2017.

kraftsystemet först kommer att uppstå i elområde SE3 och SE4, alltså i södra Sverige⁷. Detta är till stor del beroende av att kärnkraftsanläggningarna är placerade i södra delen av landet och när dessa läggs ned och inte ersätts med någon kraftproduktion med liknande egenskaper kommer stora förändringar i kraftsystemet att uppstå.

Kärnkraftsanläggningarna är dominerande kraftproducenter i systemet och varje enskild kärnkraftsanläggning utgör en stor inmatning av effekt till systemet. De bidrar även med viktiga stabiliserande egenskaper. Detta gör att varje anläggning får en stor påverkan på kraftsystemets egenskaper, vilket gör att kärnkraftsanläggningarnas möjligheter och begränsningar är viktiga för samtliga aktörer. Att kärnkraftsanläggningarna även vid anslutningen till kraftsystemet hade en dominerande påverkan framgår av stamnätsavtalet där värmekraftaggregaten som kollektiv ålades en speciell avgift för att hantera förstärkningar i systemet avseende reserver, felströmmar samt ett nytt övervakningssystem för att hantera den stora centraliserade produktionen. Samma intention går även att utläsa av IAEA:s dokumentation om vad som krävs för att ansluta reaktorer på ett säkert och ansvarsfullt sätt⁸. När nu vissa kärnkraftsanläggningar (de små och medelstora) successivt tas ur drift och ersätts med produktionsanläggningar med helt andra egenskaper ”flyttas bördan” för vissa stödtjänster till andra aktörer i systemet. Det faktum att de största anläggningarna blir kvar i drift och att dessa stora anläggningar är dimensionerande för kraven på stödtjänsternas prestanda och volym, innebär att påverkan på kraftsystemet blir stor.

Kärnkraftsanläggningarna är beroende av ett stabilt kraftsystem för att kunna vara anslutna och upprätthålla en säker drift. När egenskaperna i kraftsystemet ändras kommer kvarvarande anläggningar att få en ändrad produktionsmiljö. De historiska variationerna i hur mycket ström, spänning och frekvens ändras vid olika störningar i kraftsystemet samt hastigheten med vilken variationerna sker ändras när små och medelstora kärnkraftsanläggningar fasas ut. Det här innebär en utmaning för kraftsystemet som helhet men det är även av särskild vikt för kärnkraftindustrin då delar av reaktorernas säkerhet påverkas av kraftsystemets tillgänglighet och tillförlitlighet. Här behöver kärnkraftsbolagen, men även övriga aktörer som ägare och tillsynsmyndighet, ha en tydlig förståelse för anläggningarnas roll i kraftsystemet och eventuellt nya förutsättningar för en så säker drift som möjligt. När förändringarna i kraftsystemet skapar nya förutsättningar är ett samarbete med systemansvarig nödvändigt för alla aktörer så att en systemoptimering med de nya förutsättningarna kan vidtas och säkerställa

⁷ Affärsverket svenska kraftnät, ”Systemutvecklingsplanen 2018 -2027 - mot ett flexibelt kraftsystem i en föränderlig omvärld,” Sundbyberg, 2017.

⁸ IAEA, ”Electric Grid Reliability and Interface with 7 Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NG-T-3.8,,” IAEA, Vienna, 2012.

en så stabil drift som möjligt av hela systemet. Behov av sådana samarbeten beskrivs bland annat i ^{9 10 11 8}.

Då kraftsystemets stabilitet minskar redovisar denna utredning kärnkrafts-
anläggningarnas förmåga att bidra med mer flexibilitet för att förbättra elsystemets
stabilitet. Kärnkraften har inte haft en lika självklar roll i kraftsystemet som en
flexibel aktör, såsom till exempel vattenkraften. Kärnkraften har andra fysikaliska
egenskaper, möjligheter och begränsningar än vad till exempel vattenkraft och
vindkraft har. Dessa egenskaper måste ur ett kraftsystemperspektiv tydliggöras och
tas hänsyn till när möjligheterna och begränsningarna för kärnkraften att bidra
med flexibla tjänster till kraftsystemet studeras^{12 10}.

Utredningen kommer att avgränsa sig till att studera vad som är möjligt att
genomföra avseende flexibel drift av anläggningarna för att stabilisera elsystemet
och vilka förutsättningar anläggningarna som är tänkta att köra längre än till år
2020 har för att fortsatt kunna ha en så stabil drift som möjligt.

Rapportens upplägg

Rapporten inleds med en kort beskrivning av aktörerna som omfattas av rappor-
tens innehåll. Rapporten är därefter uppdelad i tre huvuddelar. Del 1 omfattar
kärnkraftens bidrag och påverkan på kraftsystemets driftsäkerhet och
leveranssäkerhet. Del 2 omfattar kärnkraftsanläggningarnas behov av ett
driftsäkert kraftsystem med hög leveranssäkerhet. Del 3 går igenom kraftsystemets
kommande behov av flexibilitet och kärnkraftsanläggningarnas förmåga till flexibel
drift. Rapporten avslutas med slutsatser.

Kort beskrivning av aktörers roller och ansvar

Att göra nedbrytningen av roller och ansvar och ha en gemensam bild skapar förut-
sättningar för att både identifiera och implementera åtgärder som kan förbättra
situationen och skapa tillräcklig marginal för en säker och effektiv drift av kraft-
systemet. Samtliga aktörer har olika ansvar och mandat där det är viktigt att alla
får rätt förutsättningar för att kunna vidta nödvändiga åtgärder. Då kärnkrafts-
anläggningarna påverkar systemets egenskaper, och således även driften av
kraftsystemet och sin egen produktionsmiljö, är det viktigt att dessa aktörer
involveras i utvecklingen och att en dialog upprätthålls kontinuerligt när
förändringar genomförs. Om tjänster identifieras som kärnkraftsanläggningarna
kan utföra är det en självklarhet att anläggningsägarna involveras i diskussionen.

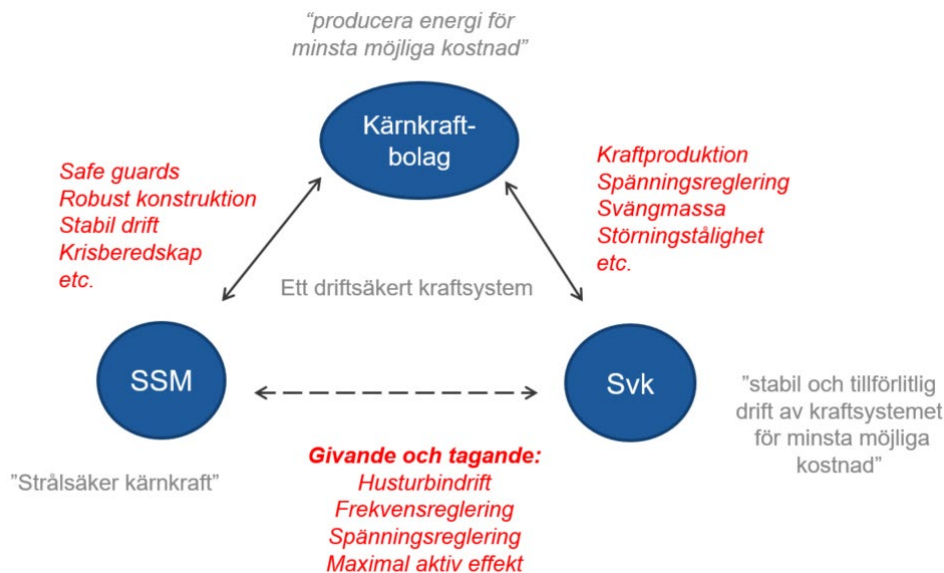
⁹ Kommissionens förordning (EU) 2017/1485 av den 2 augusti 2017 om fastställande av riktlinjer för driften av
elöverföringssystem, 2017.

¹⁰ Ellagen (1997:857), 1997.

¹¹ NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, "NEA No. 7056
Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems," OECD/NEA, Paris, 2012.

¹² SukFS 2005:2 Driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar, 2005.

Liknande arbeten med andra produktionsslag i fokus har genomförts, bland annat med Hav- och vattenmyndigheten¹³.



Figur 2 Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) är ansvarig myndighet för tillståndsprövning och tillsyn för kärntekniska verksamheter, *Kärnkraftsbolagen* i Sverige är Forsmark kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag och Ringhals AB. Den svenska *systemansvarige myndigheten* är Svenska kraftnät (Svk). Pilarna indikerar kommunikationen mellan aktörerna.

Figur 2 illustrerar några exempel inom vilka områden som samarbete och utbyte av information vidtas för att varje aktörs ansvarsområde ska uppfyllas. Den streckade pilen mellan Strålsäkerhetsmyndigheten och Svenska kraftnät (Svk) visar på att det inte finns någon direkt kontaktyta mellan dessa, men att aktörernas beslut påverkar kärnkraftsanläggningarnas konstruktion, driftförutsättningar och kraftsystemets leveranssäkerhet. Därför bör god förståelse mellan dessa två aktörer upprätthållas framförallt när kraftsystemet är under förändring och konstruktionsantaganden och driftprinciper behöver omvärderas¹⁴.

Nedan ges en kort introduktion till kärnkraftsanläggningarnas, Strålsäkerhetsmyndighetens och Svenska kraftnäts roller och ansvar.

Kärnkraftsanläggningar

Kärnkraftsanläggningarna har som mål att producera el till lägsta möjliga kostnad med högsta möjliga säkerhet och minsta möjliga omgivningspåverkan.

¹³ Energimyndigheten, *ER 2016:11 Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet*, Eskilstuna: Energimyndigheten, 2016.

¹⁴ IAEA, "Electric Grid Reliability and Interface with 7 Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NG-T-3.8.," IAEA, Vienna, 2012.

Kärnkraftsbolaget är innehavare av tillstånd för kärnteknisk verksamhet och är ansvarig för att anläggningen ska vara tillräckligt säker oavsett driftläge. En kärnkraftsanläggning är en kraftproducent ur ett marknadsperspektiv, där innehavaren av anläggningen deltar som en marknadsaktör på den nordiska elmarknaden.

En kärnkraftsanläggning omfattas av många lagar och skyldigheter där samordning mellan aktörer och myndigheter ingår. Till exempel ingår åtgärder inom beredskapsfrågor och elsäkerhetsfrågor som måste beaktas vid drift av en kärnteknisk anläggning. Innehavare av tillstånd för kärnteknisk verksamhet har det fulla ansvaret att kärnkraftsanläggningen är strålsäker. Detta betyder att det är deras ansvar att vidta åtgärder för att alltid säkerställa strålsäkerheten oavsett driftläge. Detta innebär även att beslutet om att producera el ligger på ansvariga för driften av anläggningen och att mandatet att vidta erforderliga åtgärder innehas av de som driver anläggningarna.

En kärnkraftsanläggning är en kraftproducent och således en marknadsaktör på elmarknaden. Detta gör att anläggningarna även omfattas av bland annat Europa-kommissionens tredje inre marknadspaket om en gemensam europeisk energimarknad och den svenska Ellagen. Detta rör tekniska minimikrav, transparens och förbud mot marknadsmissbruk på en konkurrensutsatt marknad. Men även skyldigheter att samverka och dela information med systemansvarige för att säkerställa en säker systemdrift.

Strålsäkerhetsmyndigheten

Strålsäkerhetsmyndigheten arbetar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning. Arbetet genomförs genom att utforma regler och pröva tillstånd för verksamheter med strålning samt bedriva tillsyn mot verksamhetsutövare.

Strålsäkerhetsmyndigheten har många lagar, direktiv från EU-kommissionen och internationella avtal att förhålla sig till. Samtliga går att hitta på www.ssm.se. SSM har bland annat till uppgift att:

- > Sprida kunskap om sitt verksamhetsområde. Detta för att till exempel motverka ohälsa och säkerställa att strålning inte får oönskade effekter för människor och miljö.
- > Kommunicera om risker med kärnteknisk verksamhet, samordna beredskap och stötta övriga myndigheter och samhälle med expertkunskap.
- > Ansvara för att säkerställa efterlevnaden av lagen om kärnteknisk verksamhet, dvs. verka som tillsynsmyndighet.
- > Ansvara för tillstånd enligt lagen om kärnteknisk verksamhet, fungera som tillståndsgivande myndighet.

Tillstånd för kärnkraftverk lämnas av regeringen. Strålsäkerhetsmyndigheten ställer krav på strålsäkerheten och följer upp att de som driver kärntekniska anläggningar uppfyller kraven samt att de tar sitt ansvar för säkerheten. Således kan man kort beskriva det som att de svarar för vad som är en tillräckligt säker kärnkraftsanläggning. Lagen om kärnteknisk verksamhet styr att hänsyn till nyttan med säkerhetshöjande åtgärder ska tas vid prövning av ärenden och myndighetsförordningen styr att hänsyn till nyttan med verksamhetsområdet för samhälle och stat ska tas. Strålsäkerhetsmyndigheten kan, och ska när så krävs, besluta om åtgärd, villkor eller ange ett föreläggande för att säkerställa efterlevnad av lagar och föreskrifter. Detta får även göras med sanktioner.

Vid till exempel en kategori 1 - händelse¹⁵ är det Strålsäkerhetsmyndigheten som ska godkänna en återgång till effektdrift. För händelser av mindre allvarlig art, samt andra anmälningar som ej kräver godkännande enligt föreskrifterna, så värderar Strålsäkerhetsmyndigheten de anmälningar som inkommit från tillståndshavare av kärntekniskanläggning och beslutar om tillsynsinsatser.

Affärsverket svenska kraftnät

Affärsverket svenska kraftnät är systemansvarig myndighet. Systemansvarig innebär att genom egna insatser och samordning av andras insatser se till att tillförlitligheten (se figur 1) i kraftsystemet kan upprätthållas samtidigt som kostnader för systemdriften optimeras. Svenska kraftnät har många lagar, EU-förordningar och avtal att förhålla sig till. Tillika har även Svenska kraftnät ett flertal uppgifter inom dammsäkerhet och elberedskap. Samtliga roller och uppgifter går att läsa om på www.svk.se. Som systemansvarig för elkraftsystemet har Svenska kraftnät bland annat i uppgift att:

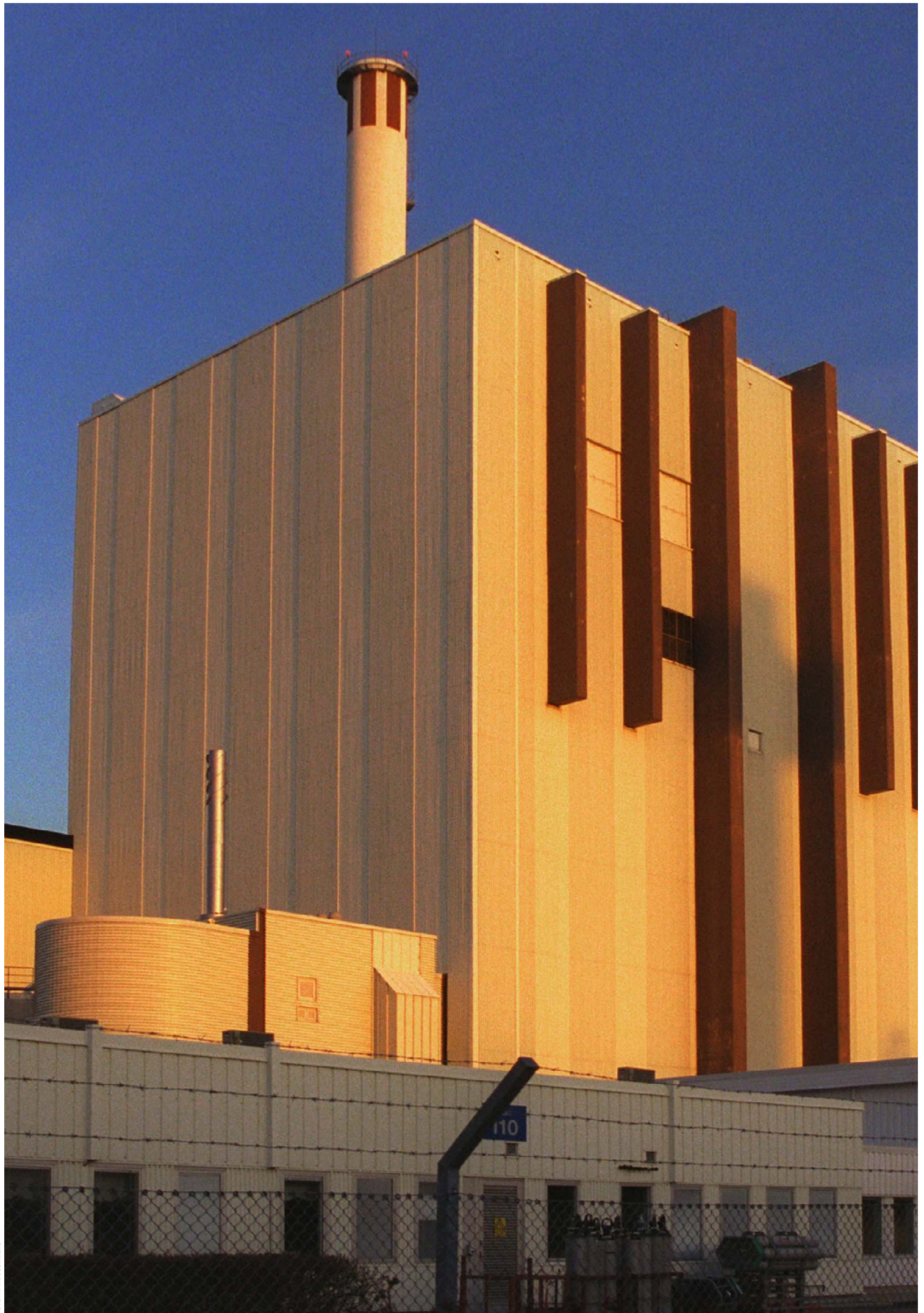
- > Balansera produktion och förbrukning i elsystemet.
- > Främja en öppen konkurrensutsatt elmarknad.
- > Anskaffa tjänster och åtgärder som behövs för det övergripande systemansvaret för ett driftsäkert och stabilt kraftsystem. Detta ska göras på ett öppet, icke-diskriminerande och marknadsbaserat sätt.
- > Inom verksamhetsområdet se till att möjligheterna att bygga ut förnybar elproduktion underlättas.

För att kunna utföra uppdraget som systemansvarig myndighet för elkraftsystemet är det viktigt att ha en tydlig kommunikation med systemets aktörer, men även förståelse för vilka begränsningar och möjligheter som finns i systemet. Kravet på

¹⁵ Konstaterade allvarliga brister i en eller flera barriärer eller i djupförsvaret, samt grundade misstankar om att säkerheten är allvarligt hotad

en monopolist att vara effektiv, öppen och icke diskriminerande sätter ramar för hur en systemansvarig ska agera.

Enligt EU:s tredje inre marknadspaket är en systemansvarig även en marknadsaktör och omfattas bland annat av direktiven och förordningarna om en gemensam europeisk energimarknad. Detta rör bland annat tekniska minimikrav, transparens och förbud mot marknadsmissbruk på en konkurrensutsatt marknad.



Del 1 – Kärnkraftsanläggningarnas bidrag till driftsäkerheten och leveranssäkerheten

Del 1 i utredningen är baserad på Svenska kraftnäts tidigare arbeten om förutsättningarna för ett kraftsystem med fortsatt hög driftsäkerhet^{16 17}. Arbetet har skett i samarbete med experter från enheterna Driftanalys och Systemanalys inom Svenska kraftnät.

Kraftsystemet – elektrifiering av Sverige

Historiskt konstruerades och byggdes kraftproduktionen och transmissions-systemet koordinerat som en enhet. Uppbyggnaden skedde stegvis i takt med att samhällets behov av elkraft växte och målsättningen att nyttja de inhemska resurserna för elproduktion och göra sig oberoende av import av till exempel kol- och oljebaserad produktion. Kraftsystemet hade en expansiv utveckling från 1950-talet fram till mitten av 1980-talet. Under denna tidsperiod skedde en kraftig utveckling av kraftsystemets kapacitet. Först byggdes den storskaliga vattenkraften som senare följdes av utbyggandet av kärnkraftsanläggningar, samt HVDC-förbindelser¹⁸. I och med den kontinuerliga utvecklingen och koordineringen mellan kraftproduktion och transmission kunde systemet optimeras och egenskaper hos produktionsanläggningarna utvecklas och utnyttjas för att stabilisera systemet. Med ett tillräckligt stabilt kraftsystem kunde stora kärnkraftsanläggningar anslutas¹⁹ och införandet av HVDC-länkar möjliggjordes.

Under en relativt lång tid, 1960-talet fram till början på 1990-talet, togs det fram olika arbetsformer mellan kraftsystemets aktörer. Ett stamnätsavtal formades och en stamnätsnämnd bildades. Stora kraftproducenter hade ett ansvar att leverera kraft, vilket reglerades via en samkörningsgrupp²⁰. Ansvarsfördelningen medförde att kraftproducenterna hade en medvetenhet om sin roll i kraftsystemet och att de var delaktiga i att upprätthålla en stabil drift av systemet där samtliga aktörer hade ett leveranssäkerhetsmål att förhålla sig till.

År 1992 bildades Affärsverket svenska kraftnät^{20 21} vilket skapade en juridisk separation av kraftnätet från kraftproduktionen. Kraftproduktionen utsattes för konkurrens medan kraftnäten bildade så kallade naturliga monopol. Svenska kraftnät fick förutom rollen som nätägare av stamnätet för elöverföring även rollen

¹⁶ Affärsverket svenska kraftnät, "Systemutvecklingsplanen 2018 -2027 - mot ett flexibelt kraftsystem i en föränderlig omvärld," Sundbyberg, 2017.

¹⁷ Affärsverket svenska kraftnät, "Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnyelsebar elproduktion - en slutrapport från Svenska kraftnät," Sundbyberg, 2015.

¹⁸ Utgiven av Kommittén för tekniska egenskaper hos värmekraftstationer, "Tekniska egenskaper hos värmekraftstationer av särskild betydelse för kraftsystemets drift," Statens Vattenfallsverk, 1969.

¹⁹ Strålsäkerhetsmyndigheten, "2016:36 Säker kraftförsörjning i svenska kärnkraftsanläggningar? – En historisk betraktelse," Strålsäkerhetsmyndigheten, Solna, 2016.

²⁰ Närings- och teknikutvecklingsverket, "B 1991:6 Elmarknad i förändring, från monopol till konkurrens," Närings- och teknikutvecklingsverket, Stockholm, 1991.

²¹ Regeringen, *Regeringens proposition 1991/92:133 om en elmarknad med konkurrens*, Stockholm: Regeringskansliet, 1991.

som systemansvarig myndighet. Det innebar bland annat ansvaret för att säkerställa att kraftsystemets delar samverkar driftsäkert. Förändringen medförde således en juridisk uppdelning av ansvaret i kraftsystemet men tekniskt förblev det, och är fortfarande, samma system.

Kraftsystemets stabilitet – en förutsättning för säker drift

För att driften av kraftsystemet ska ske säkert och effektivt behöver fysikaliska villkor uppfyllas avseende kraftsystemets egenskaper. Kraftsystemets stabilitet avgör hur väl systemet kommer klara olika typer av störningar. Stabiliteten är alltså en avgörande faktor för systemets tillförlitlighet, se figur 1. Detta har även en direkt påverkan på hur god leveranssäkerheten i kraftsystemet är, alltså förmågan att leverera elkraft när den behövs. Egenskaper som bidrar till kraftsystemets stabilitet brukar benämnas som ”systemtjänster” (EU Direktiv 2009/72/EG definierar det dock som stödtjänster). Kärnkraftsanläggningarna är en av flera aktörer som bidrar med olika egenskaper som säkerställer kraftsystemets stabilitet.

Frekvensstabilitet

Frekvensstabilitet handlar om kraftsystemets förmåga att upprätthålla balansen mellan produktion och förbrukning. Frekvensstabiliteten är direkt kopplad till hur väl denna balanshållning efterlevs i systemet, både under normal drift och efter att systemet utsatts för en störning.

Frekvensstabiliteten är i huvudsak beroende av tre egenskaper i systemet; tillgång på svängmassa (kinetisk energi), reserver och dimensionerande felfall. Dessa tre är varandras designförutsättningar och måste anpassas till varandra.

Svängmassa är systemets samlade roterande energi (kinetiska energin) och avgörs av mängden direktanslutna roterande maskiner. Vid eventuella fel i kraftsystemet bidrar svängmassan till att bromsa frekvensförändringen genom den upplagrade roterande energin som finns i synkront anslutna turbiner, generatorer och motorer. Detta gör att kraftsystemets frekvenssvar vid störningar blir långsammare med stor rotationsenergi och andra frekvensreglerande funktioner har möjlighet att återställa frekvensen.

Reserver är till för att återställa systemet vid såväl normal drift som vid störningar. Om störningens omfattning är inom **N-1-kriteriet** ska stödtjänsterna för frekvensregleringen, primärregleringen, automatiskt hantera situationen och aktiveras inom fem till tio sekunder. Frekvensen kan sedan återställas manuellt med sekundärreglering till samma nivå som före störningen. Vid störningar utanför N-1-kriteriet är primärregleringen inte dimensionerad att klara av att återställa frekvensen till ett nytt stabilt läge. Då ska istället en rad **skyddsfunktioner** i form av snabbt effektstöd från HVDC-länkarna och i sista hand lastbortkoppling aktiveras för att hindra frekvensen att sjunka till så låga nivåer att

produktionsanläggningarnas underfrekvensskydd aktiveras. Vid ett sådant scenario befinner sig kraftsystemet i nöddrift.

Dimensionerande felfallet i ett kraftsystem bestämmer maximal obalans som kraftsystemet ska tåla utan att hamna utanför tillåtna driftgränser för fastställda storheter såsom frekvens, spänning och ström. De största produktionsanläggningarna avgör kostnaderna för primärregleringen under hela året, i och med att ju större produktionsbortfall som kan ske i ett kraftsystem desto mer reserver måste systemoperatörerna hålla tillgängliga. Bortfall av kärnkraftsanläggningar utgör oftast, p.g.a. att de är de största produktionsanläggningarna, det största felfallet inom det nordiska systemet. Utöver kärnkraftsanläggningarna kan även HVDC-förbindelser vara dimensionerande fel i det nordiska kraftsystemet.

Kärnkraftsanläggningarnas bidrag och påverkan. Kärnkraftsanläggningarnas bidrag till frekvensstabiliteten idag är genom svängmassan via den synkront anslutna generatoren, och således även turbinaxeln, samt leverans av aktiv effekt. Kärnkraftsanläggningar är idag optimerade för en konstant leverans av aktiv effekt, så kallad baslastdrift. Vidare är kärnkraftsanläggningarna, tillsammans med vissa HVDC-kablar, några av de största enheterna i kraftsystemet och därför sätts även mängden reserver och skyddsfunktioner efter maximal uteffekt för att klara N-1 kriteriet^{22 23 24}.

Färre antal kärnkraftsanläggningar, och annan synkron kraftproduktion, anslutna till kraftsystemet kommer att innebära att tillgänglig svängmassa minskar. Detta försämrar frekvensstabiliteten i det nordiska systemet om inga andra åtgärder vidtas. Det finns tekniska begränsningar för den övriga befintliga maskinparkens förmåga att leverera det kraftsystemet behöver i form av snabb och stabil reglering. Utveckling av frekvensreglerprodukter behöver därför genomföras²⁵. Att begränsa maximala uteffekten hos det dimensionerande felfallet, vilket ofta utgörs av en kärnkraftsanläggning, till en nivå som kraftsystemet momentant klarar att hantera utan ökad risk för att förbrukning fränkopplas är ett verktyg som behövs för att säkerställa frekvensstabiliteten²⁶. Kärnkraftsanläggningarna kommer att påverkas av systemets utveckling. Behovet av mer flexibilitet och fokus på kärnkraftsanläggningarnas stabiliserande egenskaper kommer att bli alltmer aktuell. Del 3 avhandlar en mer utförlig diskussion om flexibel körning av

²² Affärsverket Svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Anteckningar från workshop om kärnkraftens roll i kraftsystemet 31 januari 2018*, Sundbyberg, 2018.

²³ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Underlag från OKG till workshop 20180131*, Sundbyberg, 2018.

²⁴ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Anteckningar från möte om flexibilitet och leverans av systemtjänster_FKA*, Sundbyberg, 2018.

²⁵ Affärsverket svenska kraftnät, "Systemutvecklingsplanen 2018 -2027 - mot ett flexibelt kraftsystem i en föränderlig omvärld," Sundbyberg, 2017.

²⁶ ENSTO-E Nordic group, "PID Inertia2018," 2017.

kärnkraftsanläggningar och potentiella framtida driftlägen vad gäller variation av aktiv effekt.²⁷

Rotorvinkelstabilitet

Begreppet rotorvinkelstabilitet omfattar hur synkrogeneratorernas rotorvinklar förhåller sig till varandra. Rotorvinkelstabilitet handlar i första hand om att dämpa den inbördes rörelse som finns mellan generatorernas rotor. Ett mått på denna rörelse är hur mycket rotorernas inbördes vinkelskillnad varierar. Blir vinkelskillnaden för stor mellan systemets generatorer kan det resultera i att en eller flera generatorer tappar synkronismen med resten av systemet och fränkopplas. Vid störningar i systemet kommer rotorvinklarna att förändras och det kan uppstå effektpendlingar mellan generatorerna. Det som bestämmer hur stora dessa effektpendlingar blir är störningens storlek, varaktigheten av störningen och hur systemets dämpning fungerar. Blir dessa effektpendlingar för stora kan det leda till systemkollaps.

Stabiliteten kan bevaras om kraftsystemet är ”trögt” och har tillräcklig stabilitetsförmåga för att klara störningen och återföra systemet till ett nytt stabilt läge genom att pendlingar som följer av störningen dämpas ut. Naturliga åtgärder för att förbättra ett kraftsystems stabilitet är nätförstärkningar, att öka kortslutningseffekten eller spänningsstöttande åtgärder. Den förändring som systemet nu genomgår kommer att innebära att det drivs under nya förhållanden och med förändrade effektlöden, vilket nuvarande reglersystem inte är optimerade för.

Förändringarna i kraftsystemet bidrar till att minska marginalerna till rotorvinkelinstabilitet på grund av att produktion som inte är synkront ansluten till systemet har andra egenskaper än synkront ansluten produktion och inte bidrar på samma sätt med kortslutningseffekt till systemet. Bidraget till kortslutningseffekten från icke synkront kopplad produktion beror till stor del på hur den styrs under förloppet. Nätstyrkan kommer att minska med förändrad produktionsmix och marginalen till instabilitet minskar. Synkrogeneratorer över 75 MVA i det nordiska kraftsystemet är utrustade med dämptillsatser (PSS:er, Power System Stabilizers) som automatiskt hjälper till att dämpa effektpendlingar i systemet. Minskat antal generatorer med dämptillsatser innebär alltså att även dämpbidrag från PSS:er minskar, vilket kan minska marginalerna till rotorvinkelinstabilitet ännu mer.

En tredje faktor som kan minska marginalerna till instabilitet är att överföringen i systemet ökar och att fler utlandsförbindelser kommer att byggas. Det innebär att mer effekt ska överföras över större avstånd vilket i sig innebär en risk för att rotorvinkelinstabilitet kan uppstå. Samma utveckling skedde under åttiotalet när

²⁷ ENTSO-E's Nordic region, "ENTSO-E's Nordic region - Studies on frequency stability in the Nordic system," ENTSO-E, 5 mars 2018. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/nordic/Pages/default.aspx>.

överföringen mellan de nordiska länderna ökade och pendlingar uppstod. Då blev rotorvinkelinstabilitet i flera fall det som begränsade maximal överföring mellan elområden.

Kärnkraftsanläggningarnas bidrag och påverkan. Kärnkraftsanläggningarna bidrar med både turbinsträngens rotationsenergi, turbinregleringen och med PSS:ens förmåga att dämpa ut effektpendlingar i kraftsystemet. Förändringar i produktionsapparaten, både vad gäller egenskaper men även geografiska placeringar, gör att rotorvinkelstabiliteten i kraftsystemet kommer att förändras. Kärnkraftsanläggningarnas förmåga att jämna ut effektlöden i och med strategiska placeringar och förmåga till dämpning via PSS:erna ger marginaler för kraftsystemets rotorvinkelstabilitet. De bidrar till kraftsystemets förmåga att hantera fel och föra över stora mängder effekt från norr till söder.

Ett exempel på ingrepp av PSS skedde den 9 november 2011 där Oskarhamn 3:s PSS ingrep och dämpade ut en ca 100 MW effektpendling på ca 10 s ²⁸.

Spänningsstabilitet

Spänningsstabilitet är kraftsystemets förmåga att upprätthålla stabila spänningsnivåer och återgå till ett nytt jämviktsläge efter att ha utsatts för en störning. För att ett system ska vara spänningsstabilt krävs att systemets behov av reaktiv effekt i varje enskild del av nätet kan tillgodoses. Om detta villkor inte är uppfyllt betraktas systemet som spänningsinstabilt med ökad risk för att en spänningskollaps kan inträffa.

En spänningskollaps kan innebära elavbrott för hela eller delar av systemet. Spänningskollaps var upphov till den senaste storstörningen i södra Sverige (år 2003). Anledningen till att varje del av nätet måste ha rätt mängd reaktiva resurser följer av de fysikaliska lagarna vilka säger att reaktiv effekt i princip inte kan överföras över stora avstånd. Detta innebär att överföring av reaktiv effekt kan förvärpa spänningsinstabiliteten vid störningar. Det är alltså viktigt att den reaktiva effekten produceras eller konsumeras på rätt ställen i nätet för att säkerställa spänningsstabiliteten. En annan kritisk faktor är vilken typ av kraftsystemkomponent som bidrar till spänningshållningen. Det finns två huvudgrupper av komponenter, dels de dynamiska steglösa komponenterna, som generatorer och komponenter baserade på kraftelektronik, och dels de brytarkopplade, stegvisa, komponenterna som shuntkondensatorer och shuntreaktorer. Att ha dynamiska steglösa komponenter är avgörande för att säkerställa en god spänningsstabilitet.

²⁸ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Underlag från OKG till workshop 20180131, Sundbyberg, 2018.*

Kärnkraftsanläggningarnas bidrag och påverkan. När antalet till stamnätet direktanslutna synkrongeneratorer minskar, t.ex. genom nedläggning av kärnkraftsanläggningar, innebär det att mängden dynamiska komponenter som bidrar till överföringssystemets spänningsstabilitet minskar. Generatorerna i kärnkraftsanläggningarna är dimensionerade för att i normaldrift ha en reaktiv förmåga som specificeras i SvKFS 2005:2, dvs. att kunna leverera reaktiv effekt om 1/3 av den aktiva effekten²⁹.

Huvudgeneratorns automatiska spänningsreglering (AVR) i kärnkraftsanläggningarna bidrar till att behålla en fix spänningsnivå på generatorskenan. Detta gör att kärnkraftsanläggningarna dynamiskt följer spänningsvariationerna i kraftsystemet och reglerar den reaktiva effekten automatiskt under normaldrift.

Utbytet av reaktiv effekt mellan kärnkraftsanläggningarna och kraftsystemet är en viktig faktor då spänningsnivåerna måste hållas inom vissa gränser för att ha en kostnadseffektiv och säker drift av anläggningarna. Utvecklingen i kraftsystemet medför att kärnkraftsanläggningarnas spänningsreglering kan komma att behöva användas i större utsträckning för att upprätthålla spänningsstabiliteten^{30 31}.

Stabil drift – en förutsättning för en väl fungerande elmarknad

Överföringskapaciteten bestäms ofta av stabilitetsfenomen och mindre ofta av ledningarnas termiska kapacitet. Som beskrivits i föregående avsnitt innebär det att överföringskapaciteten skulle vara högre om kraftsystemstabiliteten kan bevaras och förbättras. Nätinfrastrukturen kan inte utnyttjas till sin fulla kapacitet då kraftsystemets stabilitet (alltså kraftsystemets ”styrka”) minskar. Det är inte endast färre antal kärnkraftsanläggningar som påverkar kraftsystemets stabilitet. Dock blir nedläggningen av fyra kärnkraftsanläggningar inom en relativt kort tid en bidragande faktor då de i form av stora synkrongeneratorer, med en kritisk placering i systemet, bidrar med egenskaper som upprätthåller stabiliteten.

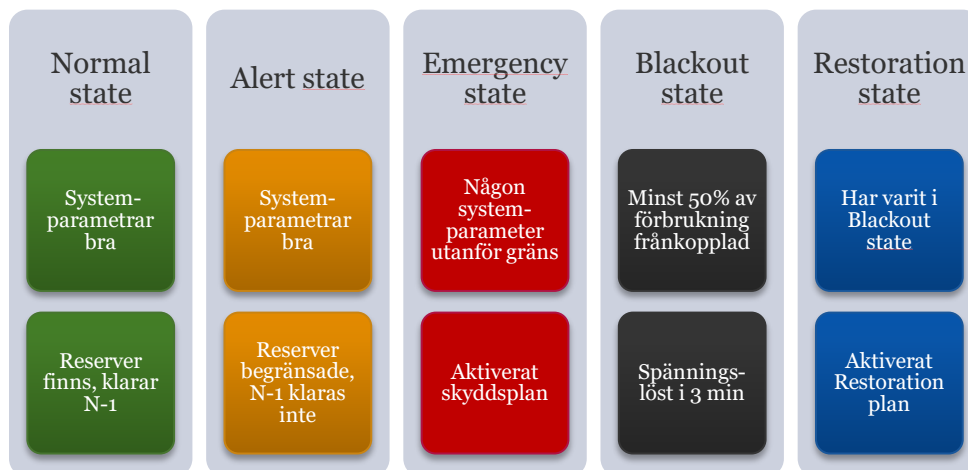
Ett tillräckligt driftsäkert kraftsystem – marginaler för en säker drift
I och med införandet av ny reglering från EU-kommissionen om gemensamma regler inom EU har den systemansvarige ett ansvar att hålla systemet inom normal drift och att anskaffa de mest kostnadseffektiva åtgärderna för att upprätthålla ett stabilt och driftsäkert kraftsystem. Åtgärderna syftar till att säkerställa att systemet har en tillräcklig robusthet för att kunna köras och klara av dimensionerande fel.

²⁹ SvKFS 2005:2 Driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar, 2005.

³⁰ Affärsverket svenska kraftnät, *Suk 2017/3593: Underlag från OKG till workshop 20180131*, Sundbyberg, 2018.

³¹ Affärsverket svenska kraftnät, *Underlag från möte om flexibilitet och systemtjänster_RAB, 20180514*, Sundbyberg, 2018.

Systemdrifttillstånden definieras i EU förordning 2017/1485 artikel 18 och sammanfattas i figur 1³².



Figur 3 Fem drifttillstånd som kraftsystemet kan befinna sig. Som systemansvarig myndighet har Svenska kraftnät i uppgift att vidta åtgärder för att hålla kraftsystemet i normal drift eller se till att kraftsystemet återgår till normal drift.

1. Normalt drifttillstånd. Exempel: Spänning och effektlöden ligger inom gränser acceptabla för driftsäkerheten, att reaktiva och aktiva reserverna räcker till för att klara N-1 kriteriet för möjliga förutsedda händelser.
2. Skärpt drifttillstånd. Exempel: N-1 kriteriet uppfylls inte fullt ut eller om reservkapaciteten är reducerad under en viss tid.
3. Nöddrifttillstånd. Exempel: Gränserna för driftsäkerhet har överträtts för både normalt drifttillstånd och skärpt drifttillstånd.
4. Nätsammanbrott. Exempel: Mer än 50 % av förbrukningen inom ett kontrollområde för en systemansvarig har fallit bort.
5. Återuppbyggnadstillstånd. Exempel: Åtgärder för återuppbyggnad efter antingen ett nöddrifttillstånd eller ett nätsammanbrott har påbörjats enligt återställningsplanen.

Förmågan att kunna hålla systemet inom normal drift är ett mått på hur stora marginaler systemet har. Ett robust system innebär att systemet ska inneha en tillräcklig förmåga att hantera dimensionerande fel eller att systemet har skyddsfunktioner som kan gå in och styra tillbaka systemet till nära normal drift. Om en störning ändå skulle uppstå som systemet inte är dimensionerat för ska begränsande och återuppbyggande funktioner vidtas. Att kunna förebygga, skydda och begränsa störningar i kraftsystemet är fundamentalt för systemets driftsäkerhet. Som beskrivits tidigare är produktionsapparaters uppbyggnad och egenskaper fundamentala för kraftsystemets tillförlitlighet och påverkar hur kraftsystemet kommer att bete sig och således röra sig mellan de olika systemdrifttillstånden.

³² Kommissionens förordning (EU) 2017/1485 av den 2 augusti 2017 om fastställande av riktlinjer för driften av elöverföringssystem, 2017.

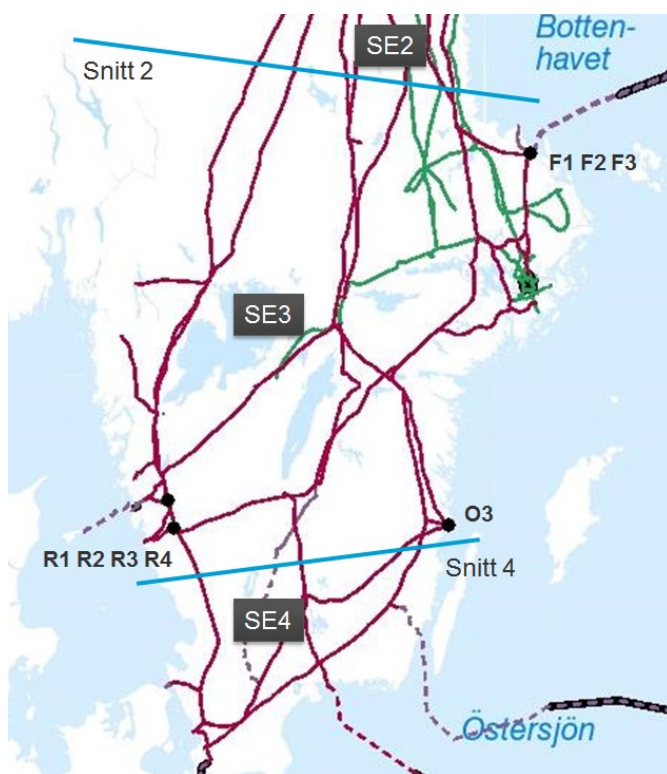
Kärnkraftsanläggningarna kommer att påverka hur kraftsystemet rör sig mellan systemdrifttillstånden när det blir få centraliserade stora kraftproducenter i kombination med många små decentraliserade anläggningar.

Kärnkraftsanläggningarnas tillgänglighet och förmåga till stabil drift påverkar inom vilket systemdrifttillstånd som systemet befinner sig i och således vilka åtgärder som behöver vidtas.

I systemdrifttillstånden normal drift till skärpt drift är systemstabiliteten mycket avgörande. De tre övriga systemdrifttillstånden som rör nöddrift, nätsammanbrott och återuppbyggnad kräver flera förmågor och skyddsfunktioner. Förmågor som krävs från kärnkraftsanläggningarna i dessa systemdrifttillstånd är exempelvis att kunna ansluta till så kallat svagt kraftsystem under återuppbyggnad. Tillika är förmågan att skydda anläggningarna samt övergången till husturbindrift viktiga aspekter för att kunna ta tillbaka systemet till normaldrift. Dessa aspekter som är mer av skyddande och begränsande åtgärder kommer inte avhandlas vidare i någon djupare omfattning i denna rapport, men är ett viktigt inslag för att vid inträffande av fel kunna ha förmågan att skydda systemet och även vidta återuppbyggnad.

Drift av kraftsystemet

För driften av kraftsystemet är kärnkraftsanläggningarnas geografiska placering viktig. Sverige är uppdelat i fyra elområden: SE1, SE2, SE3 och SE4. Det finns tre s.k. snitt inom landet: Snitt 1, snitt 2 och snitt 4 vars överföringskapacitet övervakas fortlöpande för att säkerställa balans och stabilitet i systemet. Snitten ligger mellan elområdena och infördes för att hantera flaskhalsar i nätet. I norr återfinns stora delar av svensk vattenkraftproduktion, men det är i de södra delarna av landet, SE3 och SE4, som den största andelen av förbrukningen ligger och behovet av effekt är som störst.



Figur 4 Bild över elområdesindelningen samt placering av Sveriges kärnkraftsanläggningar som är i drift 2018.

Överföringsförmågan i snitt 2 och 4 påverkas av hur många kärnkraftsanläggningar som är anslutna till kraftsystemet. Eventuella avbrott på ledningar samt tillgången till HVDC-länkarna påverkar också överföringsförmågan mellan elområdena. Kärnkraftsgeneratorerna som är stora synkrona produktionsanläggningar med en strategisk placering i systemet "håller emot" och jämnar ut effektlöden i "de tre benen" som finns i överföringssystemet inom SE3, se figur 4. Detta gör att med nuvarande lastfördelning och konsumtion undviks problem med till exempel överlast. Detta utjämningsfenomen gör att överföringen av elkraft från norr till söder sker effektivt och att snittens överföringskapaciteter inte behöver begränsas.

Med få kärnkraftsanläggningar i drift minskar kraftsystemets tillräcklighet, vilket belyses i Svenska kraftnäts årliga kraftbalansrapport. Detta aktualiserar frågan om kraftsystemet har tillräcklig produktionskapacitet för årets alla timmar. Det kommer uppkomma fler drifttimmar under åren framöver där Sverige är beroende av import från andra länder för att täcka effektbehovet³³. Dessa situationer uppstår vanligtvis under vintern då behovet av el är som störst. Det har dock även under 2017 uppstått situationer med risk för effektbrist under sommarhalvåret. Den

³³ ENTSO-E's Nordic region, "ENTSO-E's Nordic region -Nordic winter power balance," ENTSO-E, 5 mars 2018. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/nordic/Pages/default.aspx>.

23 augusti var endast tre reaktorer i drift och det uppstod ett ansträngt läge för effektbalansen i SE3 och SE4 med höga elpriser som följd. Detta ger en indikering på att med färre kärnkraftsanläggningar i drift så kommer det att uppstå fler drifttimmar med liknande situationer i systemet, och det även under sommarhalvåret.

Som visualiseras i figur 1 är kraftsystemets leveranssäkerhet beroende av tillräckligt bra stabilitet (tillförlitlighet) men även att effekt (tillräckligheten) finns i rätt omfattning och speglar samhällets behov av kraft. Det är viktigt att inse att de fysikaliska egenskaperna som styr stabiliteten och effekten går hand i hand. Minskar stabiliteten så minskar även tillräckligheten. Färre antal kärnkraftsanläggningar har en stor påverkan på driften av kraftsystemet, och framför allt inom elområde SE3 och SE4. Det är alltså inte endast den installerade effekten som försvinner när en anläggning tas ur drift, utan det uppstår även begränsningar för systemdriften.

Utvecklingen innebär att det kommer inträffa fler drifttimmar under ett år där det kommer krävas ingrepp i marknaden och aktivering av fysiska åtgärder i systemet för att säkerställa en säker systemdrift.

Systemansvarig – samordning av ett driftsäkert kraftsystem

När marginalerna minskar så minskar systemets robusthet och det i sin tur ger att systemet blir mindre förlåtande mot eventuella fel. Som systemansvarig har Svenska kraftnät det övergripande ansvaret för att kraftsystemets delar samverkar på ett driftsäkert sätt. För att den samordning som ålagts Svenska kraftnät ska vara möjlig, krävs tekniska, organisatoriska och marknadsmässiga förutsättningar, vilka kan realiseras via lagstöd och avtal. För att säkra en stabil drift finns ett antal verktyg att använda sig av, men där valen ska vara det mest ändamålsenliga och kostnadseffektiva för kraftsystemet. Detta för att Svenska kraftnät ska säkerställa att systemet utnyttjar sin fulla potential för att kunna transportera och leverera effekt till förbrukare.

Anskaffandet av tjänster och åtgärder

Kategoriseringen av åtgärder och stödtjänster är inte alltid helt självklar, och med ett kraftsystem under förändring och tillkommande nya egenskaper kommer förmodligen dagens klassificering av tjänster och åtgärder att omvärderas över tid. Det finns ett behov av att bryta ner, tydliggöra och kategorisera tekniska förmågor hos anslutande aktörer för att förtydliga på vilket sätt en aktör bidrar och påverkar kraftsystemet. Det är även en förutsättning för att den systemansvarige ska ha vetskap och kontroll över vilka förmågor som finns i kraftsystemet för att säkerställa kraftsystemets tillförlitlighet.

Anslutande kraftproducenter och förbrukares bidrag till kraftsystemet är viktig. Vid anslutning av en kraftproducent är det kravställt via lag vilka förmågor som en kraftproducent ska ha för att få ansluta sig till kraftsystemet. Dessa krav på förmågor utgör grunden för kraftsystemets möjlighet att samverka driftsäkert. Det är sedan upp till Svenska kraftnät att anskaffa dessa förmågor så att kraftsystemet kan samverka driftsäkert och kraftsystemets tillförlitlighet blir så bra som möjligt.

Som systemansvarig finns ett antal åtgärder att välja mellan för att se till att systemet får de egenskaper och funktioner som behövs för att samverka driftsäkert. Till exempel kan Svenska kraftnät:

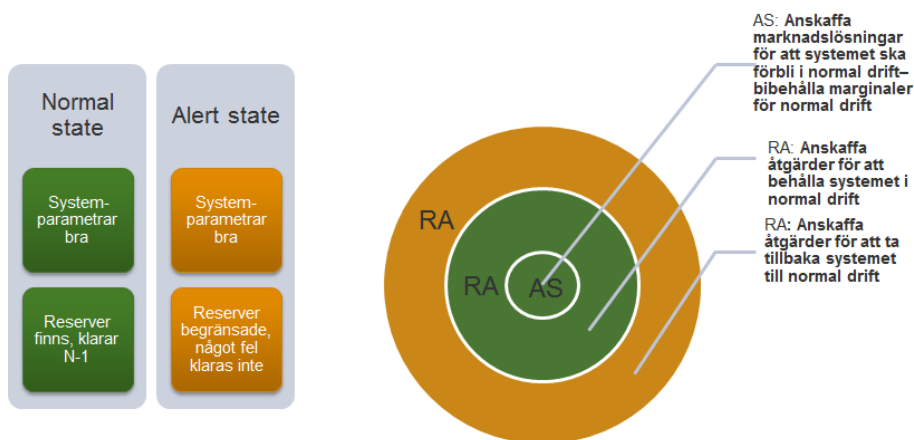
- > Anskaffa tjänster och åtgärder, vilket avgör när och i vilken omfattning de tekniska förmågorna ska kunna användas.
- > Utbyggnad och anpassningar i egen nätinфраstruktur för att säkerställa att kraftsystemet utnyttjas effektivt.

Anskaffandet av åtgärder och utformandet av stödtjänster baseras på i vilket systemdrifttillstånd de syftar till att användas inom. I figur 5 beskrivs relationen mellan avhjälpande åtgärder (remedial actions) och stödtjänster (ancillary services). Stödtjänster är den kategori som syftar till att skapa marginaler för att hålla systemet i normal drift. Dessa utformas på ett marknadsbaserat sätt ³⁴ ³⁵. För en fördjupning om hur Svenska kraftnät tillsammans med övriga nordiska systemansvariga har utformat marknadsbaserade tjänster för frekvensstabilitet och balansering se del 3.

Avhjälpande åtgärder kan vara både förebyggande men även aktiveras vid oväntade händelser för att föra tillbaka systemet till normal drift. Både avhjälpande åtgärder och stödtjänster ska anskaffas på ett icke-diskriminerande och öppet sätt. Det är därför avgörande att motiveringar görs utifrån att åtgärder är de mest lämpliga för systemet utifrån risk och kostnad.

³⁴ *Ellagen (1997:857)*, 1997.

³⁵ *Kommissionens förordning (EU) 2017/1485 av den 2 augusti 2017 om fastställande av riktlinjer för driften av elöverföringssystem*, 2017.



Figur 5 Beskrivning av relationen mellan avhjälpande åtgärder (*remedial action*, RA) och systemtjänster (*ancillary service*, AS). Stödtjänster och avhjälpande åtgärder härrör till de två första systemdrift-tillstånden. Tjänsterna och åtgärderna syftar till största delen att vara förebyggande och skyddande. En stödtjänst rör samverkan med en tredje part, medan avhjälpande åtgärder spänner över samtliga fysiska delar av kraftsystemet och ska väljas utifrån störst nytta.

Stödtjänster och avhjälpande åtgärder ska aktiveras i den del av infrastrukturen där störst nytta uppnås för att hålla erforderlig driftsäkerhet, detta omfattar både förbrukare, nätägare och kraftproducenter. Vidare finns det alltid en rimlighet att ta hänsyn till, åtgärder ska väljas utifrån att vara de mest kostnadseffektiva. Detta gör att det inte är en självklarhet att utforma en marknadsbaserad lösning och skapa en stödtjänst av varje åtgärd som vidtas för att hålla kraftsystemet stabilt.

Oavsett vilka åtgärder som vidtas kommer marginalerna för driften av kraftsystemet att minska då Svenska kraftnät inte kommer att anskaffa stödtjänster och avhjälpande åtgärder i en omfattning som är mer än absolut nödvändig. Då kraftsystemets tillräcklighet påverkar kraftsystemets tillförlitlighet kommer det innebära att marginalerna i kraftsystemet minskar. Svenska kraftnät kan inte anskaffa stödtjänster och åtgärder i sådan omfattning för att väga upp den utvecklingen och bibehålla samma robusthetsnivå som kraftsystemet tidigare har haft utan att ett leveranssäkerhetsmål införs som omfattar samtliga aktörer i kraftsystemet. Situationen innebär mer ekonomiskt optimerade nivåer på stödtjänsterna och robustheten som kraftsystemet haft reduceras.

När lösningar är framtagna och nya åtgärder införs uppstår det alltid osäkerheter. Därför behöver extra uppmärksamhet riktas på systemets behov och systemets aktörer för att inte några onödiga åtgärder, eller kontraproduktiva åtgärder, vidtas när förändringar genomförs.

Sammanfattning av kärnkraftsanläggningarnas påverkan på kraftsystemets stabilitet och drift

Kärnkraftsanläggningarna påverkar och påverkas av interaktionen med kraftsystemet. Dessa egenskaper går att sammanfatta enligt figur 6 nedan:



Figur 6 Hela kärnkraftsanläggningarna påverkar kraftsystemets stabilitet. Dessa egenskaper blir allt mer påtagliga för driften av kraftsystemet. Behovet av att ha flertal verktyg och åtgärder som utgår ifrån kraftsystemets behov för att hantera systemutmaningarna är ett måste för att säkerställa att kraftsystemet är fortsatt tekniskt kompatibelt.

Kärnkraftsanläggningarnas bidrag och påverkan på kraftsystemet är mer än endast installerad och producerad effekt. Som dominerande kraftproducenter påverkar de kraftsystemets leveranssäkerhet och driftsäkerhet på ett både positivt och negativt sätt. Kärnkraftsanläggningarna bidrar med egenskaper som påverkar kraftsystemets:

- > Frekvensstabilitet
- > Spänningsstabilitet
- > Rotorvinkelstabilitet

Vidare är kärnkraftsanläggningarnas geografiska placering viktig då de jämnar ut effektflöden och gör att överföring av kraft från norr till söder i Sverige kan ske effektivt. En medvetenhet om detta behöver finnas när åtgärder behöver vidtas då stabil kärnkraftsproduktion är en viktig faktor för kraftsystemet under många av årets drifttimmar. På samma sätt är ett stabilt kraftsystem centralt för kärnkraftverkens möjlighet att vara anslutna och kunna producera el. Att förändringar i kraftsystemet inte utmanar kärnkraftsanläggningarnas stabila drift gynnar hela kraftsystemets leveranssäkerhet.

I och med systemutmaningarna kommer fokus på kärnkraftsanläggningarnas dominerande storlek och stabiliserande bidrag till kraftsystemet att öka.



Del 2 - Kärnkraftsanläggningarnas behov av ett stabilt kraftsystem

Del 2 är bland annat baserad på material framtagna av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM)^{36 37} och av kärnkraftsbolagen Forsmarks Kraftgrupp AB (FKA)^{38 39}, Ringhals AB (RAB)⁴⁰ och OKG Aktiebolag (OKG)^{41 42}.

I kommande avsnitt tas kärnkraftsanläggningarnas behov av kraftsystemets driftsäkerhet och leveranssäkerhet upp. Att anläggningarna är anslutna till ett stabilt nationellt kraftsystem är en förutsättning för en stabil och säker drift⁴³.

Kärnkraftsanläggningarnas utveckling – i samklang med kraftsystemet

Syftet med att uppföra en kärnkraftsanläggning är att den skall producera energi, eller som Cnut Sundqvist, f.d. teknisk direktör vid ASEA-ATOM, uttryckte det ”en kärnkraftsanläggning ska vara en kilowattimfabrik”.

I Sverige byggdes det 12 st lättvattenreaktorer, varav 9 st svensktillverkade **kokvattenreaktorer** (BWR) och tre st amerikanska **tryckvattenreaktorer** (PWR). Samtliga kärnkraftsanläggningar driftsattes mellan år 1972 – 1985⁴⁴.

Utvecklingen av kärnkraftsanläggningarna har successivt gått från Oskarshamn 1 som var en relativt liten reaktor på ca 473 MW fram till utvecklingen av de stora kärnkraftsanläggningarna Forsmark 3 och Oskarshamn 3 på ursprungligen 1100 MW. Utvecklingen gav att flera av de svenska kärnkraftsanläggningarna fick ett mer utpräglat **elkraftberoende** för drift av anläggningarna. Utvecklingen av kärnkraftsanläggningarnas utformning och storlek möjliggjordes av dåtidens generatorutveckling samt kraftsystemets stabilitet och styrka^{45 46 47}. Dåvarande kraftsystem var välutvecklat när kärnkraftsanläggningarna driftsattes, där en lång

³⁶ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Anteckningar från möte om risker för strålsäkerheten vid förändrade driftförhållanden i svenska elkraftsystemet*, Sundbyberg, 2017.

³⁷ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Underlag från SSM till workshop 20180131*, Sundbyberg, 2018.

³⁸ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: f-0071680*, Sundbyberg, 2018.

³⁹ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Anteckningar från möte om flexibilitet och leverans av systemtjänster_FKA*, Sundbyberg, 2018.

⁴⁰ Affärsverket svenska kraftnät, *Underlag från möte om flexibilitet och systemtjänster_RAB, 20180514*, Sundbyberg, 2018.

⁴¹ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Underlag från OKG till workshop 20180131*, Sundbyberg, 2018.

⁴² Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Underlag OKG flexibilitet och systemtjänster_20180319*, Sundbyberg, 2018.

⁴³ Affärsverket Svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Anteckningar från workshop om kärnkraftens roll i kraftsystemet 31 januari 2018*, Sundbyberg, 2018.

⁴⁴ IAEA, ”IARA - PRIS,” IAEA, 5 mars 2018. [Online]. Available:

<https://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SE>.

⁴⁵ Strålsäkerhetsmyndigheten, ”2016:36 Säker kraftförsörjning i svenska kärnkraftsanläggningar? – En historisk betraktelse,” Strålsäkerhetsmyndigheten, Solna, 2016.

⁴⁶ IAEA, ”Electric Grid Reliability and Interface with 7 Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NG-T-3.8,” IAEA, Vienna, 2012.

⁴⁷ ASEA ATOM, ”Bilaga 1 Drift- och dimensioneringsförutsättningar, Oskarshamn 3,” ASEA ATOM, Västerås.

erfarenhet med redan utarbetade samarbeten möjliggjorde konstruktion och anslutning av stora kraftproducenter.

Hur Statens Vattenfallsverk, Sydkraft och kärnkraftsbolagen tillsammans resonerade och planerade utifrån det nationella kraftsystemets perspektiv för svensk kärnkraftsutbyggnad återfinns bland annat i rapporten från Kommittén för tekniska egenskaper hos värmekraftstationer. Ur rapporten om *Tekniska egenskaper hos värmekraftstationer av särskild betydelse för kraftsystemets drift*⁴⁸ lyfts den svenska kärnkraftsflottans förväntade inverkan på det nationella kraftsystemet. I rapporten tas till exempel kärnkraftsanläggningarnas olika reglermöjligheter upp och utgör ett exempel på hur samverkan mellan aktörerna kunde se ut.

Kärnkraftsanläggningarnas interna elkraftsystems roll för en stabil drift av kärnkraftsanläggningarna

Utformningen av en kärnkraftsanläggnings elkraftsystem har flera olika förutsättningar att förhålla sig till då de är beroende av och samverkar med, reaktor, turbin och angränsande kraftsystem såsom 400 kV, 130 kV och 70 kV. Detta gör att många förutsättningar och villkor påverkar kärnkraftsanläggningarnas elkraftsystem. När en kärnkraftsanläggnings elektriska produktionsmiljö ändras kan även anläggningens elkraftsystems förutsättningar ändras.

IAEA beskriver⁴⁹ vikten av samverkan mellan elkraftsystemet och en kärnkraftsanläggning enligt följande:

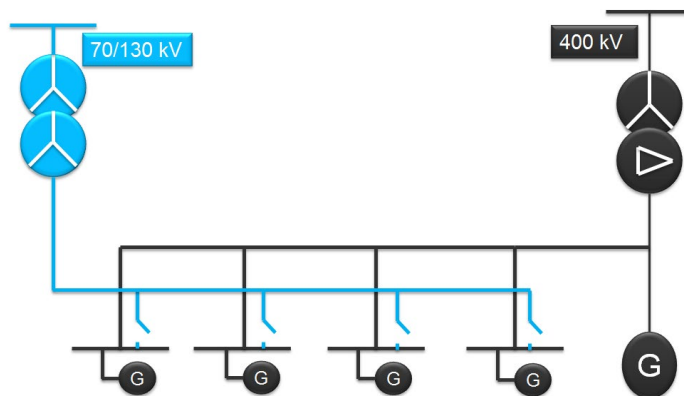
The safe and economic operation of a nuclear power plant (NPP) requires the plant to be connected to an electrical grid system that has adequate capacity for exporting the power from the NPP, and for providing a reliable electrical supply to the NPP for safe startup, operation and normal or emergency shutdown of the plant. (...) The organization responsible for the NPP and the organization responsible for the grid system will need to establish and agree the necessary characteristics of the grid and of the NPP so that they are compatible with each other.

En kärnkraftsanläggnings huvudgenerator och aggregattransformator är de komponenter som elektriskt kopplar samman anläggningen med det nationella kraftsystemet. De interna elkraftsystemen är till för att driva processen för att hålla en kärnkraftsanläggning i drift och består t.ex av pumpar, kraftelektronik och

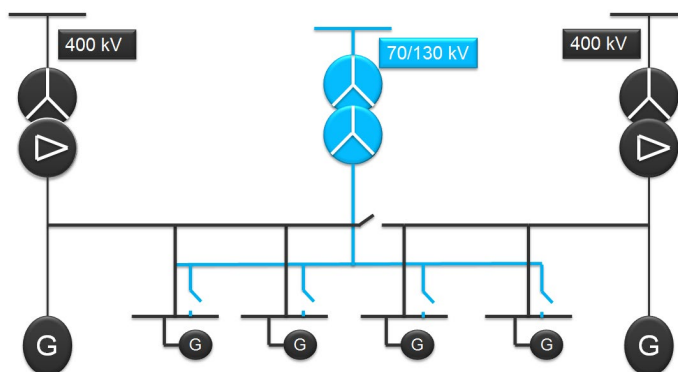
⁴⁸ Utgiven av Kommittén för tekniska egenskaper hos värmekraftstationer, "Tekniska egenskaper hos värmekraftstationer av särskild betydelse för kraftsystemets drift," Statens Vattenfallsverk, 1969.

⁴⁹ IAEA, "Electric Grid Reliability and Interface with 7 Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NG-T-3.8," IAEA, Vienna, 2012.

batterier. Som exempel kan nämnas att vid drift av en kärnkraftsanläggning är det interna effektbehovet ca 35 – 50 MW, vilket är ett likvärdigt effektuttag med en stor industri eller mindre stad i Sverige.



Figur 7 Förenklad skiss av anslutningsprincip av en enturbins kärnkraftsanläggning. Enturbinsanläggningarna i Sverige ansluts med generator och turbin till 400 kV stamnätet via ett ställverk. En kärnkraftsanläggning kraftförsörjer sina interna elkraftsystem via en avlänkning från generatorm. Då internsystemen behöver mycket kraft för att köras (den totala internförbrukningen är mellan 35-50 MW) så är en stark kraftförsörjning avgörande. Detta gör att samtliga drift- och säkerhetssystem är i normaldrift kopplade till en gemensam kopplings- punkt till generatorm och det nationella kraftsystemet. I varje anläggning finns det fyra oberoende säkerhetssubar med totalt fyra oberoende dieselaggregat som kan startas om kraftförsörjningen från det nationella kraftsystemet inte finns tillgängligt eller om kärnkraftsanläggningen inte lyckas med övergång till husturbindrif.



Figur 8 Förenklad skiss av anslutningsprincip av en tvårturbins kärnkraftsanläggning. Tvårturbinsanläggningarna i Sverige ansluts med generator och turbin till 400 kV stamnätet via ett ställverk. I en tvårturbinsanläggning kraftförsörjer varje generator två av fyra subsystem. Då internsystemen behöver mycket kraft för att köras (den totala internförbrukningen är mellan 35-50 MW) är en stark kraftförsörjning avgörande. Detta gör att samtliga drift- och säkerhetssystem i normaldrift är kopplade till en gemensam kopplingspunkt i ställverket och det nationella kraftsystemet. I varje anläggning finns det fyra oberoende säkerhetssubar med totalt fyra oberoende dieselaggregat som kan startas om kraftförsörjningen från det nationella kraftsystemet inte finns tillgängligt eller om kärnkraftsanläggningen inte lyckas med övergång till husturbindrif.

De interna elkraftsystemen och det nationella kraftsystemet är, i och med att de är till stor del sammankopplade elkraftsystem, hela tiden fysiskt beroende av varandra. I Sverige är svenska kärnkraftsanläggningar antingen tvårturbinanläggningar eller enturbinanläggningar, en förenklad skiss av hur kopplingen till kraftsystemet ser ut återfinns i figur 7 och figur 8.

De interna elkraftsystemen i en kärnkraftsanläggning är uppdelade i så kallade **subsystem** (även kallade subar). Dimensioneringen av säkerhetssystemen avgörs av kärnkraftsanläggningarnas behov av att tryckavlasta reaktortanken och kyla härden. Kylningen kräver en viss mängd kraft för att driva pumpar och kontrollsystem. Detta behov ger på så vis en direkt koppling till kärnkraftsanläggningens aktuella driftläge där den momentana mängden värmeenergi i reaktortanken avgör hur lång tid som behövs innan behovet av elkraft uppstår.

Vid eventuella händelser eller störningar finns det ett antal nivåer av skyddande system som säkerställer att en kärnkraftsanläggnings **säkerhetsfunktioner** upprätthålls, men där några av säkerhetsfunktionerna såsom kylning av hård- och bortförsel av resteffekten (som blir följden av restprodukterna efter klyvning i härden) är beroende av elkraft. Vid förlust av kraft finns det ett antal reservkraftaggregat och olika alternativ att kraftförsörja säkerhetsfunktionerna som till exempel ångdrivna pumpar. Även ett antal elektriska skydd finns som går in och kopplar ifrån kärnkraftsanläggningen och möjliggör automatisk start av reservkraft. Samverkan mellan det nationella kraftsystemet och driften av en kärnkraftsanläggning är en komplex uppgift som bland annat beskrivs av IAEA⁵⁰ ⁵¹, men har även uppmärksammats inom OECD⁵². Vilken roll elkraftsystemets funktion spelar för en säker drift av en kärnkraftsanläggning varierar beroende på anläggningens grundkonstruktion, men interaktionen mellan kraftsystemet och en kärnkraftsanläggning är en grundförutsättning för effektiv och stabil drift där många avvägningar så som skyddsinställningar, driftomläggningar och härdoptimering vägs in.

Erfarenheter där kraftsystemet och kärnkraften samverkat på ett sådant sätt som utmanat reaktorsäkerheten har inträffat ett flertal gånger⁵³. Det har inträffat störningar där samverkan med kraftsystemet skapat dynamiska fenomen, så kallad degraderad kraftförsörjning, som inte hanterats av anläggningarnas skyddssystem på ett förväntat sätt. Kärnkraftsanläggningarna är beroende av att kraftsystemets stabilitet inte försämras så att det kan uppstå situationer där ett förändrat

⁵⁰ IAEA, "Electric Grid Reliability and Interface with 7 Nuclear Power Plants, Nuclear Energy Series No. NG-T-3.8," IAEA, Vienna, 2012.

⁵¹ Internationella Atom Energi Organet, "Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants," Internationella Atom Energi Organet, Wien, 2016.

⁵² NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, "NEA No. 7056 Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems," OECD/NEA, Paris, 2012.

⁵³ DG JRC – Institute for Energy and Transport, "EVENTS RELATED TO LOSS OF OFFSITE POWER AND STATION BLACKOUT AT NPPs," 2014.

nationellt elkraftsystem kan störa anläggningarnas drift. Som visas i figur 7 och figur 8 är det interna kraftsystemet direkt anslutet till det externa yttre kraftsystemet under normal drift av en kärnkraftsanläggning.

Omfattande arbete pågår i Sverige med att uppnå ett större oberoende mellan kraftsystemets tillförlitlighet och reaktorsäkerheten. Införandet av oberoende härdkylning är en sådan åtgärd som ökar kärnkraftsanläggningarnas reaktorsäkerhet bl.a. vid störningar i, eller bortfall av, det nationella kraftsystemet, utöver befintliga skyddsfunktioner och dieselgeneratorer. Vidare drivs det till exempel forskningsprogram inom Energiforsk⁵⁴ som syftar till att adressera frågor rörande just interaktionen mellan kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarna.

Drift- och dimensioneringsförutsättningar för en driftsäker samverkan med kraftsystemet

Vid konstruktion av kärnkraftsanläggningarna ansåg ansvariga konstruktörer och dåvarande ägare det som en naturlig del att utrusta anläggningarna med ett flertal funktioner vars huvudsakliga syfte var att bidra till ett stabilt och tillförlitligt kraftsystem. Detta trots att en kärnkraftsanläggning först och främst ska leverera energi, men det behövde kunna göras på ett tillförlitligt sätt. Det gynnade både drift- och reaktorsäkerheten att ha ett stabilt anslutande kraftsystem. För de dominerande kraftproducenterna blev det då en gynnsam situation när anläggningarna var med och stöttade hela kraftsystemet inklusive sin egen produktionsmiljö^{55 56}. Ett tillräckligt stabilt och tillgängligt kraftsystem tillgodoses i säkerhetsanalyserna för kärnkraftsanläggningarna. För att dimensionera svenska kärnkraftsanläggningar vid konstruktionen användes Nordels krav, vilket än idag utgör grunden för driften av kraftsystemet.

Exempel på dimensioneringsförutsättningar och det givande och tagande mellan kärnkraftsanläggningarnas konstruktion och kraftsystemet egenskaper (se figur 2, sidan 16) för att kraftsystemet ska kunna samverka driftsäkert är bland annat:

Driftförhållanden och produktionsmiljö. Grundläggande driftförutsättningar för kärnkraftsanläggningarna avgörs av vilka typer av förhållanden och störningar på det nationella kraftsystemet som en anläggning ska kunna hantera utan att avvika från normal drift och stanna inom acceptabelt driftområde. Detta ställer i sin tur krav på vilka egenskaper som kraftsystemet behöver tillhandahålla så att produktionsmiljön för anläggningarna förblir acceptabel både avseende risk

⁵⁴ <http://www.energiforsk.se/program/paverkan-av-yttre-nat-in-i-karnkraftanlaggningen-gino/>

⁵⁵ Strålsäkerhetsmyndigheten, "2016:36 Säker kraftförsörjning i svenska kärnkraftsanläggningar? – En historisk betraktelse," Strålsäkerhetsmyndigheten, Solna, 2016.

⁵⁶ ASEA ATOM, "Bilaga 1 Drift- och dimensioneringsförutsättningar, Oskarshamn 3," ASEA ATOM, Västerås.

för händelser och den kontinuerliga driften. Detta omfattar hela kraftsystemets stabiliserande egenskaper.

Några av egenskaperna som behöver tas hänsyn till vid dimensionering och drift av kärnkraftsanläggningarna är maximal och minsta kortslutningseffekt (kraftsystemets ”styrka”) i anslutande kraftsystem samt dess frekvens- och spänningsvariationer. Vid konstruktionen görs ett antal antagande om kraftsystemets dynamiska egenskaper, att till exempel frekvensderivatan maximalt får vara ± 2 Hz/s samt att aggregatet klarar pendlingsförlopp som sker vid jordfel och kortslutning etc.

Principer för hur kärnkraftsanläggningarna förväntas bete sig vid störningar är en grundläggande driftförutsättning. Exempelvis vid höga frekvensderivator och hög frekvens ska turbinregulatorn styra ned ångtillförseln till turbinen för att undvika övervarv och snabbstängning. Vidare innebär förmågan att leverera ut reaktiv effekt under ett antal sekunder vid vissa spänningsförhållande i kraftsystemet ett sätt att säkerställa spänningsstabiliteten i kraftsystemet.

Om det uppstår störningar som går utanför normaldriftområdet ska anläggningarna klara övergång till husturbindrift för att senare kunna fasas in på kraftsystemet så snabbt som möjligt. Syftet med husturbindriften är att snabbt kunna återuppta elleveranserna, då ett snabbstopp kan medföra att kärnkraftsanläggningar annars behöver åtskilliga timmar på sig för att återgå till effektdrift. En lyckad övergång till husturbindrift innebär att en kärnkraftsanläggning klarar av att försörja interna kraftsystemet utan att behöva påkalla säkerhetssystemen. Övergången till husturbindrift medför även att stamnätet blir mer robust genom att anslutning av en bortkopplad anläggning kan ske mer eller mindre omgående.

Anläggningarnas reglering. Det reaktiva effektutbytet mellan kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarna är en samverkan som bidrar till kraftsystemets stabilitet och kärnkraftsanläggningarnas säkra drift. Den automatiska spänningsregleringen bidrar till att hålla en konstant spänning på kärnkraftsanläggningarnas interna kraftsystem när spänningen ute i kraftsystemet varierar på grund av förändrade produktions- och konsumtionsmönster. Utbyte av reaktiv effekt sker hela tiden mellan det nationella kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarna så länge generatoren är ansluten till kraftsystemet. I det sammanhanget behöver kraftsystemets reaktiva reglerresurser samverka med kärnkraftsanläggningarnas automatiska spänningsreglering. Detta bidrar då till att det interna kraftsystemet i anläggningarna får en stabil och säker drift där spänningarna håller sig inom vad som är specificerat för normal drift. Regleringen av reaktiv effekt sker även under störda driftförhållanden för att stötta kraftsystemets spänningsstabilitet vid eventuella störningar. Förmågan till reaktiv effektregering är således större än vad som specificeras i normal drift.

Aktivt effektutbyte sker naturligt hela tiden så länge en kärnkraftsanläggning är i drift och producerar elkraft. Idag är kärnkraftsanläggningarna optimerade för att köras som baslastanläggningar, men innehar fortfarande förmågan till att reglera den aktiva effekten inom vissa driftområden. Samtliga kärnkraftsanläggningar kan utföra aktiv effekthereglering och konstruerades med tydliga reglerområden för effekt- och frekvensreglering⁵⁷. Några av kokvattenreaktorerna konstruerades således även med en förmåga som möjliggjorde stegvisa momentana effekttökningar via ångflödesreglering (s.k. "Pressure Set Point Adjustment", PSPA) för att kunna bidra med en flexiblare kraftproduktion till kraftsystemet⁵⁸ ⁵⁹. Denna förmåga har dock aldrig använts i kommersiell drift. Under konstruktionstiden av kärnkraftsanläggningarna fanns en diskussion om att värmekraftstationer i framtiden skulle kunna komma att bidra mer till regleringen av frekvensen och balanshållningen i kraftsystemet, men man drog slutsatsen att en mer flexibel kraftproduktion inte behövdes just då eftersom vattenkraftens reglerförmåga var väl utvecklad och anpassad till kraftsystemets egenskaper. För mer om aktiv effekthereglering och flexibel drift av kärnkraftsanläggningar, se del 3.

De flesta av konstruktionsvalen om vilka förmågor som kärnkraftsanläggningarna utrustades med, som ovan angivna exempel beskriver, skedde koordinerat med kraftsystemets utveckling och är idag till viss del fortfarande gällande. Vid förändringar i kraftsystemets stabilitet och tillförlitlighet behöver hänsyn tas till dessa antaganden och förutsättningar. De totala förmågorna avseende reaktiv effekt- och aktiv effekthereglering används inte i den dagliga driften av kärnkraftsanläggningarna då kraftsystemet hittills inte har haft behov av det.

Sammanfattning av kärnkraftsanläggningarnas samverkan med kraftsystemet

Sammanfattningsvis kan man säga att utformningen av det anslutande kraftsystemet sätter randvillkor för utformningen av flera delar hos kärnkraftsanläggningarnas konstruktion. Detta omfattar grundläggande drift och dimensioneringsförutsättningar samt skyddsinställningar. Detta påverkar hela kärnkraftsanläggningarnas förmåga till elkraftproduktion, men även delar av reaktorsäkerheten påverkas om kraftsystemets egenskaper förändras. Förändringarna i kraftsystemets frekvens-, spänning- och rotorvinkelstabilitet riskerar att påverka de egenskaper i kraftsystemet som kärnkraftsanläggningarna initialt dimensionerades efter. Det är därför av största vikt att följa upp och

⁵⁷ Enligt definitionerna i SvKFS 2005:2

⁵⁸ ASEA ATOM, "Bilaga 1 Drift- och dimensioneringsförutsättningar, Oskarshamn 3," ASEA ATOM, Västerås.

⁵⁹ Elforsk, "Lastföljning i kärnkraftverk, Möjliga effektheregleringar för svenska kärn-kraftverk utifrån ett internationellt perspektiv," Elforsk, Stockholm, 2011.

analysera konsekvenserna av dessa förändringar i kraftsystemets egenskaper och hur dessa påverkar kärnkraftsanläggningarna.

Att Svenska kraftnät kan utveckla och hålla kraftsystemet i normal drift är således avgörande för en fortsatt stabil drift av kärnkraftsanläggningarna. Systemegenskaper som kärnkraftsanläggningarna bidrar med till kraftsystemet (som beskrivs i del 1 om kraftsystemets stabilitet) bidrar således även till en säker drift av anläggningarna. Vid förändringar i kraftsystemet måste samverkan upprätthållas så att effektiva åtgärder kan fortsätta vidtas för att säkerställa en säker och stabil drift av kärnkraftsanläggningarna och hela kraftsystemet.

Del 3 – Förutsättningar för en mer flexibel drift

Systemutmaningen med att hålla kraftsystemets frekvensstabilitet inom acceptabla gränser kommer att påverka kärnkraftsanläggningarna. Anläggningarnas svängmassa (kinetisk energi) och maximala uteffekt är ett viktigt bidrag till kraftsystemet, framförallt när systemet förändras med en allt större andel väderberoende kraftproduktion och ej synkront anslutna förbrukare och producenter.

Vid kommande förändringar är det viktigt att med hjälp av fysikens lagar tydliggöra vad som är möjliga förändringar där nyttan med förändringen tydliggörs. Att ha ett öppet sinne och tillvarata de möjligheter som redan finns i kraftsystemet är ett måste för att hitta lösningar. Behovet av flexibla tjänster avseende aktiv effekt kommer att öka på grund av att det blir svårare att matcha förbrukning och produktion då den väderberoende produktionen ökar. Flexibla resurser behövs även för att hålla kraftsystemet stabilt. Samtliga aktörer kommer bli påverkade av förändringarna och alla ska ges möjlighet att bidra i den omfattning som är lämpligt för varje aktör.

Som beskrivits i del 1 om systemansvaret ska Svenska kraftnät sträva efter att utforma marknadsbaserade tjänster där det är lämpligt för kraftsystemets driftsäkerhet. De marknadsbaserade tjänsterna i normaldrift av kraftsystemet är frivilliga och det är upp till varje aktör och dess ägare att besluta om en kraftproduktionsanläggning ska delta på en sådan marknad. Däremot är det viktigt att Svenska kraftnät försöker utforma tekniska krav för de marknadsbaserade tjänsterna som tillåter att så många aktörer som möjligt kan delta om de så önskar.

Följande avsnitt beskriver hur Svenska kraftnät har strukturerat marknadsmässiga tjänster för frekvensstabilitet och balansering av kraftsystemet, vilka tekniska förmågor och förutsättningar kärnkraftsanläggningarna har för att köras flexibelt samt den situation som Strålsäkerhetsmyndigheten behöver förhålla sig till om kärnkraftsanläggningarna skulle börja köras mer flexibelt.

Kraftsystemet, flexibilitet och marknadsmässigt utformade stödtjänster

Det finns flera typer av flexibla tjänster som syftar till att hålla både frekvensstabiliteten och balansen i kraftsystemet, så att normaldrifttillståndet kan upprätthållas. De marknadsmässigt utformade tjänsterna för att göra detta visualiseras i figur 9 och figur 10.

Balanshållningen sköts i planeringsskedet av ett antal balansansvariga företag, vars uppgift är att planera så att all produktion och förbrukning av el i Sverige är i balans under kommande dygn. Svenska kraftnät övertar ansvaret för balansen under drifttimmen och återställer de automatiska reserver som aktiverats på grund av

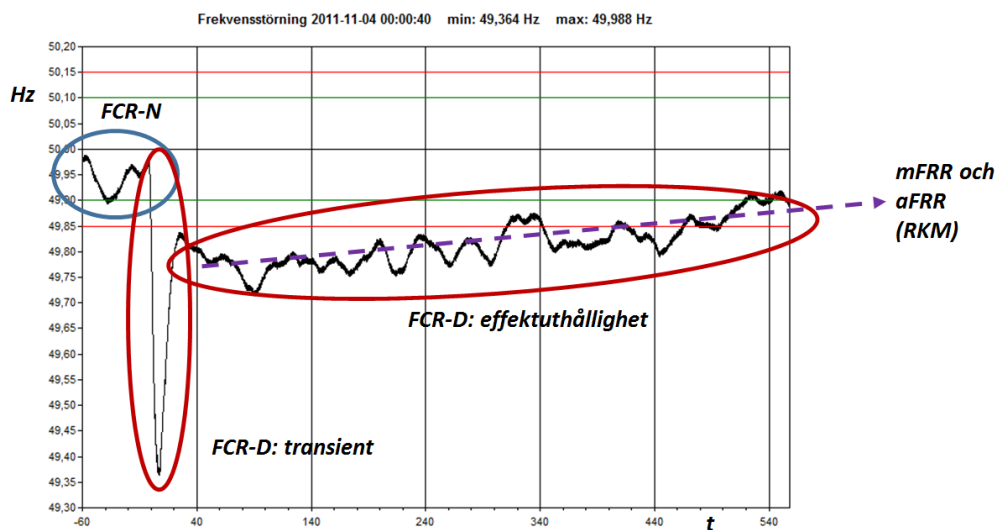
obalans genom att beordra upp- eller nedreglering av produktion eller förbrukning. Balanshållningen bygger på att kraftsystemets frekvens kontinuerligt återförs mot 50,0 Hz vid mindre variationer i produktion och förbrukning. Frekvensen ska vid normal drift hållas inom intervallet 49,9 till 50,1 Hz, vilket är ett driftsäkerhetsmål för Svenska kraftnät.

Svenska kraftnät och övriga nordiska stamnätsoperatörer upphandlar reserverna av elmarknadens aktörer med olika tidshorisonter. Det är de automatiska reserverna för primärreglering och den manuellt aktiverade snabba aktiva störningsreserven. Dessa reserver omfattar inte det totala behovet av att i efterhand reglera ut variationerna i efterfrågan på el i kraftsystemet, utan syftar till att säkerställa förmågan att initialt hantera normala avvikelser och störningar som kan inträffa under drifttimmen. Det kan t.ex. vara att de balansansvarigas förbruknings- eller vindprognoser visar sig vara felaktiga eller att produktion eller överföring av någon anledning inte följer plan. Den effekt- och energimässigt största regleringen som görs för att möta elkonsumtionen hanteras av de balansansvariga aktörerna. Detta utförs på flera tidshorisonter, från absolut närtid till långsiktig årsplanering.

Den automatiska primärregleringen består av två produkter, frekvensstyrd normaldriftreserv (FCR-N) och frekvensstyrd störningsreserv (FCR-D). FCR-N är dimensionerad för att i normaldriftläge hålla frekvensen inom intervallet 49,9 – 50,1 Hz. När de automatiska reserverna har utnyttjats måste de, inom fastställda krav med avseende på tid och volym, återställas för att säkerställa att förmågan att hantera ytterligare störningar åter finns.

Reglerkraftmarknaden (aFRR och mFRR) utgörs av reglerresurser där balansansvariga aktörer frivilligt kan delta och mot marknadsmässig kompensation öka eller minska sin planerade produktion eller förbrukning. Reglerresurserna avropas i prisordning inom Norden och den största andelen kommer från svensk och norsk vattenkraft. Detta beror på att vattenkraften är mycket konkurrenskraftig genom sin kombination av stor flexibilitet och förhållandevis låg produktionskostnad. Om resurserna på reglerkraftmarknaden är begränsade p.g.a. flaskhalsar eller är fullt utnyttjade och därmed inte räcker till kan Svenska kraftnät aktivera de upphandlade manuella reserverna snabb aktiv störningsreserv eller effektreserven.

I figur 9 beskrivs hur frekvensen förändras och hur de olika reserverna och reglerresurserna samverkar vid ett plötsligt bortfall av produktion. Hur snabbt frekvensen faller beror på den bortfallande produktionsenhetens effektmässiga storlek, den samlade mängden svängmassa i systemet och på hur snabbt den automatiska frekvensregleringen kan öka sin produktion.



Figur 9 Beskrivning av de olika reglerprodukterna, vad de syftar till att åstadkomma samt hur de förhåller sig till varandra.

Hanteringen av stödtjänster för att säkerställa en bra frekvensstabilitet och balansering kommer i framtiden att behöva vara mer dynamisk genom upphandling av varierande volymer utifrån rådande driftsituation. Strategier och verktyg kommer därför att behöva utvecklas för att effektivisera och säkerställa att rätt typ och rätt volym av reserver finns i systemet när behov i kraftsystemet uppstår⁶⁰.

	SVÄNGMASSA ⁶⁰	FFR	FCR		aFRR	mFRR	RR	
			FCR-D	FCR-N				
Styrs av:	—	Frekvens	Frekvens	Frekvens	ACE	Kontrollrum	Kontrollrum	
Hanterar:	Effekt	Effekt	Effekt	Effekt	Energi	Energi	Energi	
Ersätts ekonomiskt för:	—	Effekt	Effekt	Effekt/Energi	Energi	Energi	Energi	
Aktiveras inom:	Momentant	Någon sekund	Sekunder	1 minut	Minuter	12-15 minuter	> 15 minuter	
Aktivering, snabb till långsam								

■ Nuläge
■ Möjliga lösningar

Figur 10 Övergripande bild över reglerprodukter, befintliga men även möjlig utveckling av produkter för att möta kraftsystemets behov. FFR och FCR syftar till frekvensreglering, medan aFRR och mFRR syftar till effekterreglering.

⁶⁰ Affärsverket svenska kraftnät, "Systemutvecklingsplanen 2018 -2027 - mot ett flexibelt kraftsystem i en föränderlig omvärld," Sundbyberg, 2017.

Kärnkraftsanläggningarna och flexibilitet

Kärnkraftsanläggningarna kan utöva frekvens- och effekthereglering. Effekthereglering kan ha olika grundmotiv och kan ske med olika tidsperspektiv såsom tim-, dygn, vecko- eller säsongsureglering. Historiskt har effekthereglering vidtagits för att möta förbrukarnas behov av elkraft som varierar över dygnets alla timmar för att säkerställa att det är balans mellan produktion och förbrukning. I och med systemutmaningarna kommer det dock att finnas andra motiv till att nyttja förmågan till effekthereglering. Att upprätthålla frekvensstabiliteten innebär till exempel att tillfälliga begränsningar i maximal uteffekt kan behöva göras, vilket ger upphov till effekthereglering av de största producenterna i Norden, kärnkraftsanläggningarna⁶¹.

Tekniska minimikrav för förmåga till frekvens- och effekthereglering för anslutande kraftproduktion finns i SvKFS 2005:2 samt i kommissionens förordning (EU) 2016/631 av den 14 april 2016 om fastställande av nätföreskrifter med krav för nätanslutning av generatorer. Svenska kärnkraftsanläggningar är undantagna kravet om att ha förmåga till frekvensreglering enligt SvKFS 2005:2. Däremot så omfattas kärnkraftsanläggningarna av kraven att ha förmåga till effekthereglering.

För de produkter som utformas som stödtjänster och sker på ett marknadsbaserat sätt återfinns de tekniska kraven vid prequalificering av anläggningarna för att få delta i och buda in sin resurs för aktuell frekvensprodukt. Att buda in tjänster på en marknadsbaserad lösning är upp till ansvariga för kraftproducenten att avgöra och bestämma om det är lämpligt. Det är däremot viktigt att Svenska kraftnät vid utveckling av produkterna säkerställer att kraftsystemets aktörer har en förmåga så att en marknad kan skapas och att effektiva incitament ges. Om en förmåga är kravställd via till exempel SvKFS 2005:2 har Svenska kraftnät rätt att anskaffa denna som avhjälpande åtgärd eller ge en beordran om så krävs för kraftsystemets driftsäkerhet.

Kärnkraftsanläggningarna har från och med 90-talet producerat baskraft, vilket innebär att de är optimerade för att leverera största möjliga aktiva effekt. Överlag anses de svenska kärnkraftsanläggningarna som en oflexibel resurs, men det har inte alltid varit så. Som beskrivs i del 2 konstruerades anläggningarna för både effekthereglering (dygns- och veckoslutsreglering) och frekvensreglering^{62 63}. På 80-talet nyttjades förmågan till effekthereglering hos flertalet av kärnkraftsanläggningar för att följa den varierande förbrukningen i kraftsystemet⁶². Vid konstruktionen utrustades samtliga kärnkraftsanläggningar

⁶¹ ENSTO-E Nordic group, "PID Inertia2018," 2017.

⁶² Elforsk, "Lastföljning i kärnkraftverk, Möjliga effektheregleringar för svenska kärnkraftverk utifrån ett internationellt perspektiv," Elforsk, Stockholm, 2011.

⁶³ ASEA ATOM, "Bilaga 1 Drift- och dimensioneringsförutsättningar, Oskarshamn 3," ASEA ATOM, Västerås.

med förmåga till frekvensreglering, den förmågan har dock aldrig använts i kommersiell drift.

Vid variation av den aktiva effekten i en kärnkraftsanläggning påverkas hela kärnkraftsanläggningen. Till exempel kan vissa effektnivåer skapa vibrationer som påverkar processsystemen. Men även härden påverkas och därmed kan frågan om frekvensreglering, efter vidare utredning, bli aktuell att bedöma även för Strålsäkerhetsmyndigheten, som är ansvarig tillsynsmyndighet. Det vill säga att tillse att den flexibla driften av kärnkraftsanläggningarna sker under acceptabla förhållanden.

Aktiv effektregering av kärnkraftsanläggningar av lättvattenreakortyp

För att värma eller förånga vatten i en kärnkraftsanläggning används **kärnbränsle** som är placerad i en härd. Kärnbränslet är fördelat i **urankutsar**. Kutsarna är omslutna av ett **kapslingsmaterial** för att underlätta värmetransporten från urankutsen till det omgivande vattnet, men är även en första säkerhetsbarriär för att begränsa spridning av radioaktivt material i en kärnkraftsanläggning. Att kutsarnas kapslingar är hela är av stor betydelse. Vid förändrat körsätt kan kapslingen till bränslekutsarna påverkas och utsättas för påfrestningar. Till exempel kan effekttökningar begränsas vid uppgång på grund av bränslets inkapsling, så kallat PCI (Pellet Cladding Interaction). Det är en form av spänningskorrosion mellan själva kärnbränslet och kapslingsmaterialet som uppstår på grund av att kapsling och bränslekutsar har olika längdutvidgningskoefficient. Hänsyn till bränslet vid effekttuppgång måste därför tas vilket medför begränsningar för hur fort effekten kan ökas efter en nedgång.

För att skapa tillräckligt med värmeenergi för att omanvandla vatten till ånga behövs en **kedjereaktion** med neutroner som kan **klyva bränslet** (bränslet är av så kallat **fissilt** material som betyder att ämnet kan sönderdelas). Vid sönderdelningen frigörs ännu fler neutroner som sedan håller igång kedjereaktionen som värmer det omgivande vattnet. För att kontrollera neutronerna så att de håller sig inom rätt mängd för att få önskad mängd ånga och aktiv effektproduktion används olika metoder beroende på om kärnkraftsanläggningen är av tryckvattentyp eller kokvattentyp (båda är dock underkategorier till lättvattenreaktorer).

Generellt kan man säga att vid förändrad effekt ändras antalet neutroner, även kallat **neutronflödet**. Kontinuerliga effektförändringar påverkar hur bränslet kan utnyttjas samt vilka typer av restprodukter som blir kvar när härden är utbränd. Restprodukterna som blir kvar ska sedan slutförvaras.

Vilket körsätt kärnkraftsanläggningar har påverkar hur härden konstrueras, konfigureras och vilka restprodukter som blir kvar när härden är utbränd. Nedan ges en

övergripande beskrivning av svenska kärnkraftsanläggningars förutsättningar för flexibel drift och vilken påverkan det har på anläggningarna.

Tryckvattenreaktor (PWR) – Ringhals 3 och 4

I en tryckvattenreaktor kokas inte vattnet på primärsidan, utan det upphettade kylvattnet leds från reaktorn till värmeväxlare (ånggeneratorer) där ånga produceras på sekundärsidan.

Tryckvattenreaktorerna reglerar aktiv effekt med:

- > Styrstavar
- > Förändring av borhalt

Tillsatsen av bor i en tryckvattenreaktor är en väsentlig funktion för att ha en effektiv kontroll av neutronflödet, utbränning av bränslet samt en god neutron-ekonomi under hela driftcykeln. Under en säsong varierar borhalten från 1300-1500 ppm (färsk hård) ner mot 0 ppm (utbränd hård) för att kompensera för minskat antal neutroner som utbränningen medför. Vid slutet av driftcykeln är således tryckvattenreaktorerna mindre flexibla då borhalten redan är maximalt utspädd.

Ringhals tryckvattenanläggningar är utformade som baslastanläggningar. Reaktorn brukar benämnas som slav under turbinen vilket betyder att operatören i kärnkraftsanläggningens kontrollrum ställer in börvärde för elektrisk effekt och turbinregulatorn styr högtrycksventilerna till turbinerna. Det finns en automatisk återkoppling vid avvikelse i frekvens som idag är inställd på att reglera om frekvensen sjunker under 49,5 Hz eller överstiger 50,5 Hz. Då påverkar frekvensregulatorn börvärdet för elektrisk effekt och reglerar anläggningarna automatiskt. Om blocken skulle användas för frekvensreglering skulle driftformen innebära att **transient-budgeten** till stor del utnyttjades. Detta då varje effektändring ger en temperaturvariation i reaktorkylsystemet som därmed orsakar en termisk transient. Anläggningarna är dimensionerade för att klara ett visst antal sådana transienter under sin livstid⁶⁴.

Tryckvattenanläggningarnas reglersystem är idag designat för följande effekterreglering:

- > 5 % (pålastning/avlastning) / minut i området 15-100 %
- > 10 % laststeg i området 15-100 %

Vid längre tids deleffekt (<80 % i mer än 1 vecka) finns risker för att bränslekutsarna får kapslingstörning vid effekttökningar.

⁶⁴ Affärsverket svenska kraftnät, *Underlag från möte om flexibilitet och systemtjänster_RAB, 20180514*, Sundbyberg, 2018.

Tryckvattenanläggningarna är designade för effekterreglering 85 % av driftcykeln.

- > 12 h fulleffekt
- > 3 h ramp till 50 %
- > 6 h vid 50 %
- > 3 h ramp till 100 %

För att effekterreglera krävs ändring av borhalten i reaktorkylsystemet för att kontrollera neutronflödet och kompensera för bildandet av klyvningsprodukter med förmåga att absorbera neutroner som underhåller kedjereaktionen och därmed effekterproduktionen. För att hantera detta finns boråtervinningssystemet som kompenserar för biverkningarna vid förändrad aktiv effekt. Delar av detta system är idag avställt då effekterreglering inte har använts sedan 80-talet.

Svenska tryckvattenreaktorer har förmågan att frekvensreglera och utföra effekterreglering inom vissa områden, däremot behöver delar av systemen byggas om och parametrar ändras. Att ändra tryckvattenreaktorernas driftsätt kan få flera följdkonsekvenser som andra krav på bränslet, sämre bränsleekonomi, ökat slitage på pumpar och turbin, mer avancerad radiologi- och kemihantering samt ökade krav och omfattning på hårdnära analyser. Påfrestningar på kärnkraftsanläggningarna behöver klarställas och över tid utvärderas^{64 65}.

Kokvattenreaktorer (BWR) – Forsmark 1, 2 och 3, Oskarshamn 3

Som namnet antyder kokas vattnet i en kokvattenanläggning. Kokningen påverkar neutronflödet och således hur effekten styrs. Ånga går direkt från reaktortanken ut till turbinen. En kokvattenreaktors aktiva effekt regleras i huvudsak med:

- > Styrstavar
- > Huvudcirkulationsflödet som styr mängden ånga i reaktortanken, så kallad **void**.

I en kokvattenreaktor är turbinen slav under reaktorn. När man vill reglera upp uteffekten så ökar man effekten på reaktorn genom att öka huvudcirkulationsflödet (varvar upp HC-pumparna). För att göra detta kontrollerat finns en regulator på vilken man ställer in den uteffekt man vill ha.

Reglerförmågorna i en kokvattenanläggning varierar beroende på vilken anläggning det handlar om. Däremot är samtliga anläggningar utrustade med förmågan till frekvensreglering, men denna har aldrig använts i kommersiell drift. Precis som tryckvattenreaktorerna körs anläggningar i effekterreglering, vilket

⁶⁴ Elforsk, "Lastföljning i kärnkraftverk, Möjliga effekterregleringar för svenska kärnkraftverk utifrån ett internationellt perspektiv," Elforsk, Stockholm, 2011.

betyder att operatörerna ställer in ett börvärde för effekten (antingen termisk eller elektrisk). Turbinregulatorerna är utrustade med en dödbandsinställning som går att justera och skulle kunna aktiveras.

Vissa anläggningar kan reglera upp till ett par procent av effekten kontinuerligt runt 50 Hz. Andra anläggningar har ett möjligt reglerområde på ca ± 1 % av reaktoreffekten med en responstid i minutskala vid påkallad effektändring. En kontinuerlig mindre frekvensreglering styrs i huvudsak med huvudcirkulationspumparna.

Några av kokarvattenanläggningarna har även potential att leverera effektförändringar via manipulation av ångtrycket, det som i grundkonstruktionen kallas för PSPA. Denna funktion har inte använts i kommersiell drift, men förslag på hur den skulle kunna genomföras i en mindre skala har undersökts. Ett förslag är att när frekvensen sjunker till 49,85 Hz med en frekvensförändring på -0,04 Hz/s skulle ett mindre effektsteg kunna vidtas för att snabbt leverera en ökning av aktiv effekt. Detta möjliggörs genom att momentant ta ut mer ånga än vad som för stunden produceras i reaktortanken. På grund av neutronernas fysikaliska egenskaper så sker en snabb återkoppling i hårdnen som gör att anläggningen kan svara och producera mer ånga för att stabiliseras på den nya uteffekten. Funktionen skulle kunna användas till exempel när ett dimensionerande fel inträffar^{66 67}.

Vid långsammare effektförändringar, så som till exempel effektregering behöver utöver styrning med huvudcirkulationspumparna även styrstavsdragningar göras för att sänka eller öka effekten. Vid styrstavsdragningar ändras driftpunkten och bränslet får en annan utbränning. Påverkan på anläggningen varierar om det är långsamma eller snabba regleringar som vidtas samt hur ofta regleringarna utförs.

Eventuella bränsleskador är en begränsande faktor för hur fort en kokarvattenanläggning kan reglera effekten, och då framförallt förmågan att öka aktiv effekt efter en nedreglering.

Att ändra driftsätt behöver alltid utvärderas och valideras då det är viktigt att följa upp eventuella konsekvenser för kärnkraftsanläggningen. En ändring kan få flera följdkonsekvenser som andra krav på bränsle, sämre bränsleekonomi, ökat slitage på pumpar och turbin samt ökade krav och omfattning på hårdnära analyser. Påfrestningar på kärnkraftsanläggningarna behöver klarställas och över tid utvärderas.

⁶⁶ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Anteckningar från möte om flexibilitet och leverans av systemtjänster_FKA*, Sundbyberg, 2018.

⁶⁷ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Underlag OKG flexibilitet och systemtjänster_ 20180319*, Sundbyberg, 2018.

Förutsättningar för flexibilitet och en erforderlig strålsäkerhet

Strålsäkerhetsmyndigheten arbetar för att skapa förutsättningar för en strålsäker kärnkraft. Ett stabilt och driftsäkert nationellt kraftsystem utgör en del i detta. Om förutsättningarna i kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarnas interaktion och körsätt ändras behöver det värderas och bedömas utifrån vilken påverkan förändringen har på strålsäkerheten. Det är upp till ansvariga för kärnkraftsanläggningarna (innehavare av tillstånd för kärnteknisk verksamhet) att besluta om körsätt. Om ett sådant beslut tas är det upp till Strålsäkerhetsmyndigheten att bedöma om beslutet är tillräckligt motiverat och om körsättets eventuella påverkan på strålsäkerheten belysts och utvärderats korrekt.

Leverans av stödtjänster eller avhjälpande åtgärder som innebär automatisk styrning som kan leda till effektpendlingar i härden bör inte införas. Det finns även krav för hur variationen av den aktiva effekten får påverka bränslet, och är några av de aspekter som rör reaktorsäkerheten och tillståndsvillkoren från Strålsäkerhetsmyndigheten. Det finns ett flertal reaktorer i världen som körs flexibelt, både avseende frekvensreglering och effektregering. En ökad flexibel körning av kärnkraftsanläggningarna kan bidra till att öka kraftsystemets stabilitet och driftsäkerhet vilket gynnar samtliga anslutna kärnkraftsanläggningars produktionsmiljö. Det är dock viktigt att härden dimensioneras i den årliga härdoptimeringen med tillräckliga marginaler så att en flexibel drift inte innebär att konstruktionsgränser överskrids.

I samband med ändrat körsätt uppkommer frågor rörande principer om att yttre signaler inte ska kunna påverka en kärnkraftsanläggnings säkra drift, som till exempel frekvensreglering skulle innebära. Som konstaterats tidigare har kärnkraftsanläggningarna återkoppling via turbinregleringen avseende kraftsystemets frekvens. Det som är frågan att bedöma är inom vilket frekvensband som en frekvensreglering kan ske. Desto smalare reglerspann desto oftare sker förändringar i aktiv effekt.

De flesta av de svenska kärnkraftsanläggningarna har frekvensreglering och effektregering beskrivet i sina säkerhetsredovisningar vilket gör att det ingår i tillståndet. Förändringar som inte innebär större ombyggnationer eller ändringar av befintlig ska säkerhetsgranskas samt anmälas till Strålsäkerhetsmyndigheten, men innebär inte en ansökningsprocess som ska godkännas. Större ombyggnationer eller ändringar ska dock vara prövade och godkända av

Strålsäkerhetsmyndigheten.⁶⁸ Strålsäkerhetsmyndigheten kan dock alltid meddela tillståndshavaren villkor för driften.

Vid bedömningar om eventuellt ändrat körsätt kan Svenska kraftnät bidra med information om kraftsystemets utveckling och beskriva nyttan ändringen skulle ha för kraftsystemets stabilitet och driftsäkerhet. Detta återkommer även som en del i myndighetsförordningen att myndigheter ska samverka för att uppnå största samhällsnyttan inom sina verksamhetsområden. Eftersom den övergripande reaktorsäkerheten är beroende av kraftsystemets stabilitet finns det information att utbyta för att säkerställa att inga olämpliga optimeringar görs som kan äventyra både kraftsystemets leveranssäkerhet och kärnkraftsäkerheten⁶⁹.

Mer flexibel kraftproduktion är inte otillåten så länge den kan ske på ett säkert sätt. Då systemet förändras måste anpassningar ske för att inte omedvetet försämra möjligheterna till en strålsäker drift. Däremot måste ett berättigande av förändrat driftsätt tydliggöras⁷⁰.

Sammanfattning flexibilitet

Dagens marknad för reglerprodukter är en relativt mogen marknad för stödtjänster. Det finns dock behov av att utveckla och bredda frekvensreglerprodukterna för att säkerställa att kraftsystemet fortfarande kan köras stabilt och driftsäkert och inkludera fler aktörer. Utifrån kärnkraftsanläggningarnas fysikaliska uppbyggnad så som neutronernas inneboende egenskaper, är responstiden relativt snabb jämfört med dagens leverantörer av flexibla resurser, som huvudsakligen består av vattenkraftanläggningar. Detta är egenskaper som behövs i det kraftsystem som är under framväxt.

Idag har anläggningarna en viss förmåga till flexibilitet, framförallt effekterreglering. Detta är dock något som behöver planeras för att optimera bränslesammansättning och för att säkerställa en rimlig bränsleekonomi. För övriga flexibla tjänster, eller en markant ökad användning av effekterreglering, behöver justeringar i anläggningarnas konstruktion göras. Detta kräver ett omfattande analys- och verifieringsarbete⁷¹ ⁷². Analyserna, justeringar i konstruktion och verifieringsarbetet driver upp kostnaderna vilket gör att det även är ett ekonomiskt hinder att gå mot ett mer flexibelt körsätt.

⁶⁸ Det är till exempel ansökan om tillstånd eller återgång till effektdrift efter en kategori 1 händelse kräver ett godkännande från SSM. Övriga ärenden är oftast anmälan.

⁶⁹ Affärsverket svenska kraftnät, *Svk 2017/3593: Underlag från SSM till workshop 20180131*, Sundbyberg, 2018.

⁷⁰ *Miljöbalk*, 1998.

⁷¹ IAEA, "Non-baseload Operation in Nuclear Power Plants: Load Following and Frequency Control Modes of Flexible Operation," IAEA, Wien, 2018.

⁷² Elforsk, "Lastföljning i kärnkraftverk, Möjliga effekterregleringar för svenska kärnkraftverk utifrån ett internationellt perspektiv," Elforsk, Stockholm, 2011.

Mycket av anläggningarnas tidigare förmåga till flexibel drift finns dock inte kvar då tekniska omkonstruktioner och andra parametrar att optimera mot än innan avregleringen av elkraftsystemet har införts⁷³ ⁷⁴. I dagens energimarknad är det just optimeringen av maximal energileverans som är prioriterad då det är därifrån kraftproducenter förvärvar sin inkomst. Systemansvarig ska utveckla och driva ett kraftsystem som är så pass stabilt så att infrastrukturen kan användas på ett optimalt sätt. När marginalerna som beskrivs i del 1 minskar och behovet av flexibilitet ökar finns det behov av att ge andra incitament än maximal leverans av aktiv effekt för att ge möjligheter till ändrat körsätt, och även synsätt, på kraftsystemets baskraftanläggningar.

Svenska kraftnäts förmåga att kunna spegla och prognosera kraftsystemets kommande beteenden blir väsentligt för att ge förutsättningar för planering av flexibel drift hos kärnkraftsanläggningarna. Om kärnkraftsanläggningarna kan bli mer flexibla kan de bidra till att hålla systemet både stabilt och i balans. Denna situation skulle även kunna gynna den övergripande strålsäkerheten.

Redan under 2018 har behovet av en ökad efterfrågan av flexibilitet av aktiv effekt blivit uppenbar. Då är det framförallt frågan om att kraftsystemet behöver kärnkraftsanläggningarnas förmåga till effektregering⁷⁵. I dagens kraftsystem är det inte enbart motiverat att göra det för att följa lastens variationer, utan även variationer i övrig produktion och stabilitetsfenomen driver utvecklingen och behovet av flexibilitet.

Vid förändringar behöver samarbete och delgivning av information vid värdering och bedömning utifrån kraftsystemets behov göras mellan Strålsäkerhetsmyndigheten, kärnkraftsbolagen och Svenska kraftnät.

⁷³ Närings- och teknikutvecklingsverket, "B 1991:6 Elmarknad i förändring, från monopol till konkurrens," Närings- och teknikutvecklingsverket, Stockholm, 1991.

⁷⁴ Regeringen, *Regeringens proposition 1991/92:133 om en elmarknad med konkurrens*, Stockholm: Regeringskansliet, 1991.

⁷⁵ ENSTO-E Nordic group, "PID Inertia2018," 2017.



Slutsatser

Omställningen av kraftsystemet är en mycket stor teknisk utmaning. Kärnkraftsanläggningarnas roll i kraftsystemet har varit en fråga som diskuterats till och från under de senaste 40 åren, men nu står kraftsystemet inför det faktum att flera kärnkraftsanläggningar har tagits ur drift utan att ersättas med annan planerbar kraftproduktion. För att få förståelse från kraftsystemets aktörer om vilka åtgärder som kommer att behöva vidtas finns det ett behov av att beskriva kärnkraftens nuvarande roll i kraftsystemet, men även att förtydliga vilken påverkan färre kärnkraftsanläggningar kommer ha på kraftsystemets egenskaper och kvarvarande kärnkraftsanläggningar. Givet dessa förändringar finns det anledning att undersöka kärnkraftsanläggningarnas möjlighet att bidra med flexibilitet för kraftsystemets stabilitet.

Kärnkraftens nya roll i omställningen av kraftsystemet

När kraftsystemet förändras kommer kärnkraftsanläggningarna att få en större påverkan på kraftsystemets egenskaper. Att anläggningarna som är stora centraliserade kraftproducenter blir färre gör att egenskaperna blir mer dominerande och deras påverkan på kraftsystemet blir större än tidigare. Som dominerande kraftproducenter i kraftsystemet påverkar kärnkraftsanläggningarna även sin egen produktionsmiljö i stor utsträckning.

Det är viktigt att kärnkraftsanläggningarna som en stor aktör är med i den utveckling som kommer att ske så att hänsyn till kraftsystemets begränsningar kan beaktas, men även att den utvecklingspotential som finns kan tas tillvara. Till exempel att nyttja att kärnkraftsanläggningarna kan bli mer flexibla är en sådan möjlighet. Här behöver förutom marknadens aktörer och intressenter även tillsynsmyndigheten ha tillräcklig kunskap om hur kraftsystemets drift påverkas av kärnkraftsanläggningarnas drift, samt att påverkan sker på ett helt annat sätt än tidigare då det funnits mer marginaler i kraftsystemet.

Att återskapa den tekniska samverkan mellan kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarna som fanns då kärnkraftsanläggningarna konstruerades och anslöts är en förutsättning i den pågående omställning som kraftsystemet befinner sig i. Den omställning som nu pågår är större än då kärnkraftsanläggningarna en gång anslöts till systemet.

För att kunna hantera omställningen av kraftsystemet behöver varje del av kraftsystemets förmågor och möjligheter värderas. Kärnkraftsanläggningarna har en teknisk förmåga som inte fullt ut används idag avseende reglering av aktiv och reaktiv effekt. De skulle kunna bidra med mer flexibilitet i kraftsystemet.

Aktiv effekt

Kokvattenreaktorer har möjlighet till utökad användning av effektregering och frekvensreglering. Vissa anläggningar har även teknisk möjlighet att bidra med kontinuerlig frekvensreglering och även en mindre variant av snabb effekttökning vid frekvensstörningar i kraftsystemet.

Tryckvattenreaktorer har möjlighet att bidra med effektregering och till viss del även frekvensreglering. Anläggningarna har till exempel en automatisk återkoppling vid avvikelse i frekvens som idag går att justera.

Frekvensreglering har inte tidigare tillämpats i Sverige och behöver analyseras innan eventuell aktivering.

Dessa egenskaper skulle bidra till kraftsystemets frekvensstabilitet och balansering.

Reaktiv effekt

I samtliga kärnkraftsanläggningar finns förmåga till kontinuerlig konsumtion och produktion av reaktiv effekt. Regleringen kan ske både automatiskt och manuellt. Kärnkraftsanläggningarna bidrar idag med en dynamisk spänningsreglering. Men den totala förmågan (kapabiliteten) används inte idag utan användandet skulle kunna utökas och utvecklas med rätt incitament. Dämpningsbidrag och reaktiva resurser kan utnyttjas effektivare genom samplanering mellan de som kan tillhandahålla dessa egenskaper och därmed erhålla bättre spänningsstabilitet vid störningar i stamnätet samt jämna ut pendlingar i kraftsystemet effektivare.

Att nyttja dessa egenskaper på ett bättre sätt skulle stötta kraftsystemets rotorvinkelstabilitet och spänningsstabilitet.

Det behöver klarställas hur eventuella förändringar kan användas och anskaffas av Svenska kraftnät. Ändringar som riskerar att försämra en stabil drift av kärnkraftsanläggningarna gynnar inte någon part. Att eventuellt ändra kärnkraftverks spänningsreglering av huvudgeneratoren eller reglering av aktiv effekt är ett långsiktigt arbete där förståelse för både kraftsystemets behov och kärnkraftsanläggningarnas tillståndspliktiga regelverk, förutsättningar och verksamhet måste beaktas och tas hänsyn till.

Systemutmaningarna och kärnkraftsanläggningarna

Systemegenskaperna som levereras av kärnkraftsanläggningarna påverkar kraftsystemets planeringsförutsättningar, driftplanering samt den operativa driften. Systemutmaningarna kommer att påverka både kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarna i alla tre aspekterna. Att tydliggöra hur omfattande konsekvenserna av systemutmaningarna kan bli sätter även perspektiv på vad det är som kommer att behöva tillföras kraftsystemet för att klara den pågående omställningen.

Konstruktionsförutsättningar: Kärnkraftsanläggningarnas förmåga är fastlagd i och med att konstruktionen är gjord, men ursprungskonstruktionen

gjordes för att möjliggöra olika typer av driftsätt och regleringsmöjligheter. Systemutmaningarna gör att kraftsystemets egenskaper kommer att ändras, detta gör att kärnkraftsanläggningarna inte på samma sätt som tidigare kan räkna med att kraftsystemets tillförlitlighet förblir vad den har varit de senaste 30 åren. Kraftsystemets tillförlitlighet och stabilitet är en grundsten i kärnkraftsanläggningarnas konstruktion och säkerhetsredovisning och är därför en viktig förändring som behöver tas hänsyn till för en fortsatt driftsäker samverkan.

Driftplanering: Det pågår alltid underhållsarbete i ett kraftsystem vilket gör att under flera av årets timmar ändras vilka delar av systemet som finns tillgängligt. Kärnkraftsanläggningarnas påverkan, men även behov av kraftsystemet, gör att en god samverkan mellan anläggningarna och Svenska kraftnät avseende driftplanering är nödvändigt för att hålla en acceptabel risknivå med godtagbar överföringsförmåga. I och med färre antal reaktorer i systemet får det allt större betydelse när anläggningar är anslutna, då anläggningarna tillför kraftsystemet viktiga egenskaper och driften av kraftsystemet behöver anpassas efter vad som finns anslutet. Planering av kärnkraftsanläggningarnas driftcyklar och revisionsavställningar är information som är viktig för systemets driftsäkerhet och som kommer att bli en parameter som behöver tas större hänsyn till. Att ta med stabiliserande egenskaper i revisions- och avbrottsplaner är parametrar som behöver beaktas för att minimera risker och säkerställa systemets driftsäkerhet och leveranssäkerhet under årets alla timmar.

Drift: Konstruktion och driftplanering är till för att säkerställa att kraftsystemet är fortsatt tekniskt kompatibelt även i aktuell drifttimme och att det finns förmågor och kapacitet att fortsätta köra systemet under normala förhållanden. Dessutom behöver marginaler och förmågor finnas i systemet för att kunna hantera oväntade händelser som alltid kommer att uppkomma. Att i driftskedet kunna ta hänsyn till kraftsystemets aktuella drifttillstånd där kärnkraftsbolagen och Strålsäkerhetsmyndigheten känner till kraftsystemets förutsättningar för leveranssäkerhet är ett önskat läge. Oavsett om det är kärnkraftsanläggningarna som har oväntade problem eller om det är störningar i stamnätet ska underbyggda beslut i driftskedet kunna tas där samtliga aktörer är medvetna om eventuella följdkonsekvenser som kan uppkomma.

Tydliga roller och ansvar

Att roller och ansvar är tydliggjorda är viktigt för att rätt aktör, det vill säga den med ansvar och mandat inom ett specifikt område, blir involverade i processen när förändringarna pågår. I denna rapport har ägarbolag, kärnkraftsbolag och ansvarig tillsynsmyndighet medverkat för att bredda perspektiven då samtliga har en inverkan på kärnkraftsanläggningarnas drift och således kraftsystemets leveranssäkerhet. Kärnkraftsanläggningarna regleras precis som kraftsystemet av omfattande regelverk, så väl nationellt som internationellt. Detta adderar en viss komplexitet i hanteringen vid förändringar, men målet med regelverken är

gemensamma; att ha ett driftsäkert kraftsystem med hög leveranssäkerhet, vilket gynnar en strålsäker och stabil drift av kärnkraftsanläggningarna.

Den grundläggande riskhanteringen var vid konstruktionen av kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarna likartad och i samklang. I och med separeringen av kraftproducenter och kraftnätet som skedde på 90-talet har verksamheterna utvecklats separat utan någon kontinuerlig samverkan. Utvecklingen efter separationen är att kraven på kärnkraftsäkerhet har ökat medan driften av kraftsystemet blivit marknadsbaserad. Denna skillnad gör att risknivån och acceptansen för fel skiljer sig åt mellan kraftsystemet och kärnkraftsanläggningarna. Detta är en aspekt som måste medvetandegöras för att förståelse för varandras förutsättningar kan uppnås och tas i beaktande när kraftsystemet marginaler minskar och att ett stabilt kraftsystem även gynnar samtliga aktörer.

Hur samverkan mellan kärnkraftsäkerheten och driftsäkerheten ska ske är ett kontinuerligt arbete avseende roller och ansvar där utrymme inom regelverken måste hittas och hanteras för en säker samverkan. Vid förändringar behöver samarbete och delgivning av information vid värdering och bedömning utifrån kraftsystemets behov göras av Strålsäkerhetsmyndigheten, kärnkraftsbolagen och Svenska kraftnät.

Systemnytta och förståelse för kraftsystemets tekniska driftförutsättningar

Att kärnkraftsanläggningarna bidrar till kraftsystemets driftsäkerhet och leveranssäkerhet är ingen tillfällighet. Både genom sina tekniska egenskaper och geografiska placering i kraftsystemet är de viktiga anläggningar i systemets förmåga att upprätthålla balans och stabilitet. Som tidigare nämnts i rapporten togs hänsyn till kraftsystemets leveranssäkerhet vid konstruktionen av anläggningarna där systemnyttan stod i fokus. Kraftsystemet är komplext med många parametrar som påverkar driftsäkerheten. En kärnkraftsanläggning är också mycket komplex med många dynamiska fenomen och egenskaper att ta hänsyn till. Att få dessa komplexa anläggningar att samverka momentant med ett stort system som Nordens synkrona kraftsystem kräver viss närvaro och förståelse från samtliga aktörer när förändringar genomförs. Det blir särskilt viktigt nu med de stora förändringar som pågår att ha ett stabilt och leveranssäkert kraftsystem som utgångspunkt.

Systemutmaningarna betyder att bördan i kraftsystemet kommer att skifta, från att det varit kraftproducenterna som varit den stabiliserande faktorn för kraftsystemet kommer nu andra lösningar att behöva vidtas. För att kunna kommunicera och få en dialog och insikt om kommande förändringar är en grundläggande förståelse hos aktörerna för kraftsystemets tekniska förutsättningar avgörande. På motsvarande sätt är information om kärnkraftsanläggningarnas förutsättningar för en

stabil drift viktig information som Svenska kraftnät måste kunna förstå och värdera.

En tekniskt grundläggande förståelse för varandras verksamheter för att kunna bedöma och avgöra vilka åtgärder som är bäst för kraftsystemet är således en framgångsfaktor. Om inte en förståelse uppnås kommer inte åtgärder som gynnar hela kraftsystemets driftsäkerhet att kunna vidtas eller accepteras av aktörerna som den bäst lämpade. Det är ett ansvar för samtliga kraftsystemets aktörer att ha en grundläggande förståelse för de tekniska behov kraftsystemet har så att systemnyttan sätts i fokus.

Slutord

Denna rapport är en första ansats att ta fram en gemensam bild över kraftsystemets förutsättningar så att aktörer, men även intressenter, förstår vilken roll och vilken påverkan kärnkraftsanläggningarna har på kraftsystemets egenskaper. Det är således av vikt att bryta ner och förtydliga betydelsen av systemutmaningarna för kraftsystemets aktörer så att konsekvenser, risker och möjligheter kan bedömas av berörda parter för en fortsatt driftsäker samverkan.

Svenska kraftnät har ett ansvar att återge kraftsystemets status och ge förutsättningar och incitament för systemets aktörer att vidta de åtgärder som krävs för att kraftsystemet ska fortsatt samverka driftsäkert. En tydlig beskrivning av kärnkraftsanläggningarnas bidrag och påverkan ger en bättre förutsättning för Svenska kraftnät att anskaffa tjänster och åtgärder som krävs för att hantera nya fenomen i kraftsystemet som uppstår i och med omställningen av kraftsystemet.

Revisionshistorik

V 4.6 – 2018-10-05, Första godkända

V 4.7 – 2019-02-01, redaktionell reviderad version efter kommentarer från Strålsäkerhetsmyndighetens kärnkraftsledningsgrupp. Givna kommentarer, hantering av ärendet och underlag för förändringar finns tillgängliga i handlingarna Svk 2017/3593 – 28-35 samt i ärende SSM2019-219.

Ordlista

Kraftsystem: ett kraftsystem består av produktionskälla, transport och mottagare. Dessa komponenter behövs oavsett vilken typ av medium som används som energitransportör för att kunna utgöra ett kraftsystem och upprätthålla dess funktion. Svenska elkraftsystemet består av kraftproducenter (vindkraft, vattenkraft, kärnkraft) som producerar elkraft som sedan transporteras via transmissionssystemet och övriga nätnivåer till mottagare, alltså elkonsumenter.

Leveranssäkerhet: hela kraftsystemets förmåga att kunna upprätthålla leveranserna av el till elanvändarna.

Frekvensstabilitet: kraftsystemets förmåga att hålla frekvensen stabil i normal drift och vid störningar.

Rotorvinkelstabilitet: förmågan hos de synkront anslutna generatorerna att förbli synkroniserade, dvs. förmågan att hålla rotorvinkelskillnaden liten mellan generatorerna i normal drift och vid störningar.

Spänningsstabilitet: kraftsystemets förmåga att hålla en enligt uppsatta kriterier godtagbar spänningsnivå i alla noder i normal drift och vid störningar.

Stödtjänst: innebär att genom egna insatser och samordning av andras insatser se till att tillförlitligheten i kraftsystemet kan upprätthållas samtidigt som kostnader för systemdriften optimeras.

Systemtjänster: samlingsnamn på funktioner som är fundamentala för att upprätthålla ett stabilt kraftsystem och därmed även för leveranssäkerheten.

Balansering: alla åtgärder och processer, inom alla tidsramar, genom vilka systemansvarig säkerställer att balansen mellan produktion och förbrukning upprätthålls, vilket innebär dels att systemfrekvensen hålls inom ett fördefinierat stabilitetsområde, dels att det finns nödvändiga reserver.

Tillförlitlighet: kraftsystemets förmåga att upprätthålla stabiliteten och kunna motstå störningar.

Tillräcklighet: varje delsystem (produktionsapparaten och de olika näten) i kraftsystemet har tillräcklig kapacitet för att tillgodose användarnas behov av energi och effekt.

Driftsäkerhet: förmågan hos varje del (produktionsanläggning och de olika näten) i kraftsystemet att upprätthålla säker drift, att bibehålla normalt tillstånd eller att snabbt återgå till normalt tillstånd, definierat av uppsatta kriterier.

Dimensionerande fel: den största förväntade störning som kan inträffa och som systemet har dimensionerats för.

N-1 kriteriet: kraftsystemet ska klara att hantera att en komponent faller bort och ha förmågan att anpassa sig till den nya driftsituationen och samtidigt upprätthålla områdets leveranssäkerhet.

Kokvattenreaktor: en reaktortyp där vanligt vatten används som kylmedel och moderator. I en kokvattenreaktor produceras vattenånga inuti reaktorn. Ånga leds från reaktorn till turbinerna som driver generatoren som producerar el. Vattenånga kondenseras därefter i en kondensor och pumpas tillbaka till reaktorn.

Tryckvattenreaktor: en typ av lättvattenreaktor. I en tryckvattenreaktor står vattnet under så högt tryck att det inte kokar. Det heta vattnet pumpas genom tuber i stora värmeväxlare där vatten, som inte varit i kontakt med reaktorhärden, förångas.

Oberoende härdkylning: villkor för drift framtagna av Strålsäkerhetsmyndigheten som syftar till att öka svenska kärnkraftsanläggningars förmåga till härdkylning under extrema förhållanden.

Sub: samtliga anläggningar har konstruerats med ett antal system för att upprätthålla drift och säkerhet – dessa system är indelade i subar. Ordet ”sub” kommer ursprungligen från engelskans ”subdivisions” men har inom svensk kärnkraftsindustri blivit ett etablerat begrepp.

Säkerhetsfunktion (i en kärnkraftreaktor): tekniska system som en anläggning har försetts med för att på ett specifikt sätt skydda anläggningens barriärer (SSMFS2008:1)

Kärnbränsle: är bränslet i kärnkraftverk. Består oftast av fissilt material i en urankuts.

Urankutsar: Bränslekutsen är den minsta enheten av kärnbränslet i en kärnreaktor. Den består oftast av sammanpressad uranoxid och är oftast cylinderformad med en diameter på cirka 10 mm.

Kapslingsmaterial: Ett rör som bränslekutsarna är staplade i. Kapslingsröret ska förhindra kemiska reaktioner mellan kärnbränslet och kylmedlet samt innesluta de radioaktiva ämnen som bildas i röret under bestrålningen. Kapslingsröret och bränslekutsarna kallas för bränslestav.

Bränsleskada: orsakas i regel av att skräp, exempelvis en metallflisa, oavsiktligt hamnat i reaktor- och bassängvattnet (processvattnet). Om skräpet sedan fastnar i någon komponent av ett bränsleelement kan det skava hål på bränslekapslingen.

Konsekvensen blir då att uran läcker ut i processvattnet. En bränsleskada kan begränsa reglerhastigheten vid till exempel aktiv effektereglering.

Kedjereaktion: då en kärnreaktor som innehåller klyvbart material kan upprätthålla en kedjereaktion.

Kärnteknisk anläggning: sammanfattande benämning på anläggningar där man utvinner kärnenergi (kärnkraftverk), tillverkar kärnbränsle, upparbetar kärnbränsle eller hanterar eller lagrar kärnavfall. Även forskningsreaktorer räknas hit.

Lättvattenreaktor: reaktor som använder lättvatten, det vill säga vanligt vatten (H_2O) som kylmedel och moderator. De kärnreaktorer som finns i Sverige är av lättvattentyp.

Resteffekt: effekten som utvecklas från en kärnreaktor på grund av kvarvarande radioaktivitet efter det att reaktorn har stängts av.

Fissilt material: material som kan klyvas av neutroner. Vid klyvning uppstår nya neutroner vilket leder till att en kedjereaktion kan upprätthållas. I en kärnkraftsanläggning innebär det att en tung atomkärna delas (klyvs) i två ungefär lika tunga delar, oftast samtidigt som neutroner avges.

Härdsnödkylning: att tillföra vatten till reaktorhärden för att kyla bränslet om den normala kylningen av någon orsak skulle försvinna.

Void: förhållandet mellan ångbubblor och vatten (moderator) i en kokvattenreaktor. Tillgång på mängden vatten påverkar neutronflödet i en kokvattenreaktor.

Svenska kraftnät är ett statligt affärsverk med uppgift att förvalta Sveriges stamnät för el, som omfattar ledningar för 400 kV och 220 kV med stationer och utlandsförbindelser. Vi har också systemansvaret för el. Vi utvecklar stamnätet och elmarknaden för att möta samhällets behov av en säker, hållbar och ekonomisk elförsörjning. Därmed har Svenska kraftnät också en viktig roll i klimatpolitiken.

SVENSKA KRAFTNÄT

Box 1200
172 24 Sundbyberg
Sturegatan 1

Tel 010-475 80 00
Fax 010-475 89 50

www.svk.se

