

Lastföljning i kärnkraftverk

Möjliga effektregreringar för svenska kärnkraftverk utifrån ett internationellt perspektiv

Elforsk rapport 12:08



Jonas Persson, Karin Andgren,
Margaretha Engström, Anders Holm,
Lars T Pettersson, Kjell Ringdahl och
Johan Sandström

December 2011

Lastföljning i kärnkraftverk

Möjliga effektregreringar för svenska kärnkraftverk utifrån ett internationellt perspektiv

Elforsk rapport 12:08

Jonas Persson, Karin Andgren,
Margaretha Engström, Anders Holm,
Lars T Pettersson, Kjell Ringdahl och
Johan Sandström

December 2011

Förord

Elforsks programråd för Kärnkraftsfrågor har beställt föreliggande projekt med syftet att undersöka förutsättningarna för att göra kärnkraftverk lastföljande i samband med ett förväntat ökat behov av flexibel kraft i vårt framtida elsystem. Föreliggande studie har därför genomförts av Vattenfall Research and Development AB på uppdrag av Elforsk inom programområdet för Kärnkraft. Jonas Persson har varit projektledare med assistans av Karin Andgren.

Projektet har följts av en styrgrupp med följande ledamöter: Harri Tuomisto och Göran Hult Fortum Power, Anna-Maria Wiberg Vattenfall AB, Inge Pierre Svensk Energi, Camilla Söderqvist E.ON Kärnkraft Sverige och Lars Wrangensten Elforsk.

Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla råd och synpunkter.

Stockholm i december 2011

Lars Wrangensten

Elforsk AB
Programområde Kärnkraft.

Sammanfattning

Elforsks programråd för kärnkraftsfrågor har identifierat ett ökat behov av flexibel kraft i vårt framtida elsystem och har därför finansierat en studie av kärnkraftens förmåga till flexibel elproduktion. Studien är indelad i två delar, del A består av en litteraturstudie av vad som görs i omvärlden inom flexibel kärnkraftsproduktion. Här ingår också en beskrivning av tekniken som används vid effektregering i både kok- och tryckvattenreaktorer, vilka är de två reaktortyper som finns i Sverige. Dessutom beskrivs framtida reaktorkoncept (Generation III+) möjlighet till flexibel elproduktion. Del B utreder vilken påverkan på anläggningen förväntas bli om den producerade effekten i ett kärnkraftverk varierar. Även relevanta säkerhetsaspekter i samband med flexibel kärnkraftsproduktion analyseras i del B.

Majoriteten av världens kärnkraftverk används som baslastanläggningar. Detta eftersom investeringskostnaden är hög och bränslekostnaden är relativt låg i ett kärnkraftverk. Om landets andel el från kärnkraft är stor (åtminstone mer än 50 %) kan det dock vara önskvärt att reglera den producerade effekten för att möta efterfrågan vid en viss tidpunkt. Frankrike är det land i världen med högst andel el från kärnkraft och där används flexibel kärnkraft rutinmässigt för att följa efterfrågan. Man använder sig både av långsam och planerad nedreglering i effekt under nätter och över veckoslut (s.k. lastföljning), primärreglering (automatisk frekvensreglering) för att understödja frekvensen på elnätet samt av sekundärreglering kopplad till elmarknaden.

Det svenska elsystemet har länge kännetecknats av att kärnkraft är basproduktion och att vattenkraft används dels för basproduktion men även för att svara för de variationer i efterfrågan som löpande sker. I framtiden förväntas en inhemsk utbyggnad av vindkraften, vilket kommer att öka behovet av flexibel elproduktion. Dessutom kan framtida beslut, liknande den införda indelningen av Sverige i elprisområden fr.o.m. den 1 november 2011, påverka behovet av reglerkraft. En flexibel kärnkraftsproduktion kan komma att utgöra en viktig del av den svenska energimarknaden.

Lastföljning i kärnkraftverk har förekommit i Sverige, främst under 80- och 90-talet, dock har primärreglering med hjälp av kärnkraften aldrig utnyttjats.

Rent tekniskt är det möjligt att använda sig av både lastföljning och primärreglering i båda de svenska anläggningstyperna, kok- och tryckvattenreaktorer. Tekniken går företrädesvis ut på att ändra reaktiviteten (antalet kärnklyvningar) i kärnan och därigenom den producerade effekten. Det finns dock vissa skillnader på hur kok- och tryckvattenreaktorer effektregeras vilka redovisas närmare i rapporten. Nya modernare reaktorsystem som finns att köpa på marknaden har generellt god förmåga till flexibel elproduktion. De olika tekniker som används för att reglera effekten i framtida reaktorkoncept återges.

Påverkan på anläggningen till följd av en varierande elproduktion beror på i vilket effektområde man önskar reglera produktionen samt hur stor effektförändringen är. Påverkan förväntas vara liten vid primärreglering (+/- 5 % av märkeffekten).

Vid större lastförändringar förväntas relativt liten påverkan så länge ändringen är maximalt 3 % av märkeffekten per minut samt håller sig inom 65 – 100 % av märkeffekten. De svenska reaktorerna har en märkeffekt på omkring 1 GW vardera. Vid rutinmässig användning av dessa moderata effektförändringar

är det främst olika bränsleaspekter som behöver tas hänsyn till. Driftsättet kommer att medföra att bränslet inte utnyttjas optimalt. Detta gäller speciellt om man inte planerat för lastföljning då reaktorn laddas med nytt kärnbränsle.

Påverkan på sekundärsidan av reaktorsystemet, innehållande bland annat turbin, generator och kondensor, förväntas också vara liten om effektändringen håller sig inom ovan nämnda gränser. Om det är önskvärt att rutinmässigt använda kärnkraftverken för att följa lasten i elnätet inom ovan angivna gränser behövs heller inga större anläggningsförändringar genomföras. Det bör dock nämnas att varje förändring från kontinuerlig märkeffektsproduktion medför en ökad risk för olika störningsförlopp som i absolut värsta fall kan leda till ett oönskat driftstopp.

Säkerheten i samband med flexibel kärnkraft styrs främst av två regelverk, dels regelverket kring den nukleära anläggningen och dels elnätsregelverket. Lastföljande kärnkraft utgör inget hinder ur ett säkerhetsperspektiv. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) har inga synpunkter på att kärnkraftverken reglerar den effekt som levereras till elnätet. Däremot är primärreglering något som måste utredas och tillståndsprövas av SSM innan det tas i drift. Orsaken är att den producerade effekten i kärnkraftverket vid detta driftsätt skulle då komma att styras automatiskt från en signal från det yttre elnätet. Det går att bygga robusta reglersystem som kan genomföra detta reglersätt på ett säkert vis, men dess utformig måste prövas av Strålsäkerhetsmyndigheten.

Slutsatsen är att det inte finns några tekniska hinder att använda kärnkraften för flexibel elproduktion. Det görs idag i till exempel Frankrike och det är möjligt att rutinmässigt använda sig av lastföljande kärnkraft även i Sverige.

Summary

The council at Elforsk for nuclear power has identified an increased need for flexible power in our future power system and therefore Elforsk been financing a study of the possibility for nuclear power to have a flexible power production. The study is divided in two parts, part A consists of a literature study of what is done in the world in the area within flexible power production from nuclear power. Here is also included a description of the technique that is used both for Boiling Water Reactors (BWR) and Pressurized Water Reactors (PWR), which are the two nuclear reactor types that exist in Sweden. It is also described the future reactor concepts (Generation III+) ability to have a flexible power production. Part B investigates what the influence on the plant is expected to be when varying the power production. Also relevant aspects of safety are analyzed in part B.

The majority of the world's fleet of nuclear power plants is today used as constant base power production sources. This is done since the investment cost is high and the fuel price is relatively low in a nuclear power plant. If the part of a country's power production from nuclear plants is high (at least more than 50 %) it is needed to vary the produced power in order to meet the actual demand for a given time point. France is the country in the world which has the highest proportion of electricity coming from nuclear power and there is flexible nuclear power used daily to meet the load demand. In France both slow and fast load-following during nights and weekends, primary control to support the power frequency with power, as well as secondary control to the electric market.

The Swedish power system has for a long time being characterized by base power production from nuclear and that hydropower is used both for base power production as well as for balancing the power system. In the future it is expected a domestic expansion of wind power, which will increase the need of flexible production. In addition, future decisions, like the sectioning of Sweden into four price areas from November 1, 2011, influence the need of regulating power. A flexible power production from nuclear power plants can form an important component on the Swedish power market.

Load following in nuclear power plants has been performed in Sweden, mostly during the eighties and nineties. However, primary control with nuclear power has never been performed in Sweden.

Technically it is possible to do both load-following and primary control with the two reactor concepts in Sweden, i.e., Boiling Water Reactors (BWR) and Pressurized Water Reactors (PWR). The technique is preferably to change the reactivity (the fission) in the reactor and thereby the produced power. However, there are some differences in how the power is varied between the two reactor concepts, which is outlined in the report. New, modern reactor concepts that can be bought on the market have generally good ability to act flexible. The different techniques that today (2011) exist on the market is summarized in the report.

The influence on the plant as a consequence of the flexible power production is according to in which interval it is demanded to vary the production as well as how large the variation of the produced power is. The influence related to primary control (+/- 5 % of rated power) is assumed to be small.

In case of large variations of produced power, the influence on the plant is small as long as the change of power is not more than 3 % of rated power per minute and that the interval of the variation is within 65 – 100 % of rated power. The Swedish reactors have a rated power at approximately 1 GW. At continuously use of these moderate changes of power it is mostly different aspects of fuel economy that has to be considered. The flexible operation of the plant will result in that the fuel is not used optimally. This is especially the case if it was not planned to run the plant in load-following mode when the reactor was loaded with new fuel.

The influence of the secondary side, containing turbine, generator, and condenser, is expected to be small if the change of power is within the mentioned limits above.

If it is wished to frequently act load following within the limits above it is not needed any large changes at the plants. However, here it is needed to emphasize that every change from the continuously production at rated power results in an increased risk for disturbances that in its extreme case can result in an undesired stop of production.

The security in connection with flexible power production of nuclear plants is set by two regulations; the nuclear regulation and the grid requirement. Load following is approved from a security perspective, the Swedish Radiation Safety Authority has no viewpoints on that nuclear plants are varying the produced power. However, primary control has to be investigated by the Authority before it can be approved. The reason for this is that the produced power would then be automatically controlled by the power frequency, which has to be approved. It is possible to build robust control loops for this but these loops has to be approved by the Authority.

The conclusion is that there are no technical obstacles to use the Swedish nuclear power production for flexible production. This is today done in for instance France and it is possible to start doing this also in Sweden routinely.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Definition av lastföljning	2
1.3	Vad kan ett reglerbart kärnkraftverk leverera?.....	3
1.4	Rapportens struktur	3
2	Länder med lastföljning i kärnkraftverk	5
2.1	Frankrike	5
2.1.1	Slutsats av lastföljning i Frankrike	7
2.2	Tyskland	7
2.2.1	Lastföljning med tryckvattenreaktorer	7
2.2.2	Lastföljning med kokvattenreaktorer	10
2.2.3	Slutsats av lastföljning i Tyskland	11
2.3	USA.....	13
2.4	Japan	13
2.5	Sydkorea	13
2.6	Sverige	14
2.7	Sammanfattning av länder med lastföljning i kärnkraftverk	15
3	Kartläggning av tekniken	17
3.1	Effektreglering i kärnkraftverk	17
3.2	Skilnader på hur kok- och tryckvattenreaktorer effektregleras	19
3.2.1	Effektreglering i en kokvattenreaktor	19
3.2.2	Effektreglering i en tryckvattenreaktor	22
3.3	Generation III+	25
3.3.1	AP1000 (Westinghouse, tryckvattenreaktor)	25
3.3.2	APWR (Mitsubishi, tryckvattenreaktor)	26
3.3.3	EPR (AREVA, tryckvattenreaktor).....	27
3.3.4	ABWR (Toshiba, kokvattenreaktor)	27
3.3.5	ESBWR (GE-Hitachi, kokvattenreaktor)	27
4	Påverkan på anläggningen	29
4.1	Anläggningsslitage och påverkan på primärsidan.....	30
4.1.1	Utökade säkerhetskrav på bränslet	31
4.1.2	Bränsleekonomi	31
4.1.3	Bränslets licensiering	32
4.1.4	Härdövervakning	32
4.1.5	Påverkan på reaktorsidan till följd av primärreglering	32
4.2	Anläggningsslitage och påverkan på sekundärsidan	33
4.2.1	Slitage till följd av lägre turbinlast	33
4.2.2	Slitage till följd av lägre matarvattentemperatur i en kokvattenreaktor	35
4.3	Sammanfattning av påverkan på anläggningen	35
5	Transientbudget	37
5.1	Allmänt.....	37
5.2	Påverkan vid övergång till regelmässig lastföljning	38
6	Reglerbarhet i svenska anläggningar	39
6.1	Lastföljning	39
6.2	Primärreglering	40
6.3	Vilka förändringar behöver genomföras i anläggningarna?	40

7	Säkerhetsaspekter	43
7.1	Lastföljning – för- och nackdelar ur säkerhetsperspektiv	43
7.1.1	Reaktorns säkerhetsmässiga förutsättningar för lastföljning	43
7.1.2	Säkerhetsmässiga aspekter knutna till elnätspåverkan	44
7.2	Aspekter på effekterreglering från Strålsäkerhetsmyndigheten	44
7.2.1	Lastföljning	44
7.2.2	Primärreglering	45
7.2.3	Sekundärreglering	45
7.2.4	Ö-drift	45
7.2.5	Lastföljnings påverkan på transientbudget	46
7.3	Aspekter på effekterreglering från Svenska Kraftnät	46
7.4	Slutsatser kring Strålsäkerhetsmyndigheten och Svenska Kraftnäts syn på effekterreglering	46
8	Uppgiftslämnare	47
9	Slutsatser	49
9.1	Fortsatta studier	50
10	Referenser	51

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Idag (2011) ser vi i energisystemet en början till ett paradigmskifte där en genomgripande förändring gör att alla energislag får förändrade roller i den nya energimix som blir följd av den nya förnybara elproduktionens intåg i energisystemet. Eftersom den nya elproduktionen har en i stor utsträckning oförutsägbart natur gör det att den behöver "backas upp", både i det långa och korta tidsperspektivet. Den nya elproduktionen har alltså därmed skapat ett behov av att göra övrig elproduktion flexibel, med syfte att bättre passa in i det framtida energisystemet. En elproduktion som kan förändras till att bli flexibel kommer därför att förädla sitt värde i den nya energimixen.

Kärnkraften har för gemene man varit något av sinnebilden för en konstant och pålitlig elproduktion. Felaktigheter kring dess förmåga till flexibel elproduktion har dock stundtals figurerat. Kärnkraftens goda egenskaper i att leverera en konstant produktion i närheten av vårt elsystems absoluta lastcenter har gjort att dess möjlighet till flexibilitet inte funnits på energi-Sveriges dagordning.

Idag behöver vi dock förbereda oss på vad tiotals TWh av el från oförutsägbara, förnybara elproduktioner behöver från övrig elproduktion där kärnkraften är en av de två stora elproduktionsslagen i vårt land, bredvid vattenkraften.

Därför är det högst naturligt att genomlys kärnkraftens möjligheter till att stödja introduktionen av de nya karakteristika som den nya förnybara elproduktionen innehar och i detta projekt har vi granskat kärnkraftens tekniska möjligheter till att vara just en sådan flexibel elproducent

En egenskap hos ett elsystem är att produktion och konsumtion vid varje tidpunkt måste vara lika stor. Efterfrågan varierar beroende på en mängd faktorer såsom klockslag, veckodag, utetemperatur etc. och det innebär att produktionen måste variera för att överensstämja med konsumtionen.

Det svenska elsystemet har länge kännetecknats av att kärnkraft är basproduktion och att vattenkraft används dels för basproduktion men även för att svara för de variationer i efterfrågan som löpande sker.

För kärnkraftverken har det inneburit att effektvariationen beroende på efterfrågan har varit begränsad och när det förekommit har det skett på ett planerat sätt med viss framförhållning.

I framtiden kan den bilden alltså förändras. Andra kraftslag kommer alltmer in i bilden. Det gäller till exempel vindkraft som till sin natur är varierande, beroende på vindens variationer. Även elnätet kommer att genomgå förändringar. En term som ofta nämns är smarta nät – Smart Grids. Då tänker man sig att till exempel fler elbilar kommer att påverka systemet då man antar att de laddas nattetid. Lokala mindre produktionsanläggningar kommer att finnas ute i distributionsnäten och avlasta de stora produktionsenheterna. Vad det här, och andra förändringar, innebär för de större produktionsanläggningarna är inte helt klart men det kommer att bli förändringar.



Figur 1.1: Utmatning till elnätet från ett av Forsmarks kärnkraftverk

I framtiden kan önskemålen/kraven öka på att kärnkraftverken ska anpassa sin produktion mer direkt till förändringar i konsumtion och övrig produktion. Det brukar kallas lastföljning. Denna kan förväntas bli större i framtiden än den hittills varit och kan även behöva ske med kortare varsel.

Fr.o.m. den 1 november 2011 delas Sverige in i fyra elområden vilket ger nya villkor för sekundärreglering eftersom denna efter detta datum kommer att säljas elområdesvis då flaskhalsar finns i systemet.

Reglerförmågan hos kärnkraftverk kan, med en större andel intermittent förnybart inslag i energiproduktionen, bli en värdefull produkt för ett kärnkraftverk.

Med det som bakgrund har Elforsk beställt en studie av vilka tekniska förutsättningar den svenska kärnkraften har för att kunna vara lastföljande.

1.2 Definition av lastföljning

En anläggning vars produktion anpassas vid ett flertal tillfällen till den föreliggande lastsituationen i ett elkraftsystem är lastföljande. Detta kan röra sig om att producera under dag- och tidig kvällstid för att under natten helt stänga av produktionen. För en kärnkraftsanläggning kan detta röra sig om att gå ner i produktion nattetid till 50 % för att under dagtid producera 100 %. Se sektion 1.1.3 i NEA [1] för en definition av lastföljande.

I denna definition ryms därför inte primärreglering (automatisk frekvensreglering) eller sekundärreglering, se sektion 1.3 nedan. Dock bör det redan här understrykas att även dessa två typer av regleringar kan levereras av ett reglerbart kärnkraftverk, vilket idag är fallet i Frankrike.

I viss litteratur blandas primär- och sekundärreglering in i begreppet lastföljning vilket får anses som olyckligt.

I detta arbete behandlas såväl lastföljning som primär- och sekundärreglering i kärnkraftverk.

1.3 Vad kan ett reglerbart kärnkraftverk leverera?

Ett kärnkraftverk vars levererade elektriska uteffekt kan varieras kan leverera ett flertal olika "produkter" till energimarknaden. Dessa produkter utgörs på Nordemarknaden av:

1. Primärreglering (automatisk frekvensreglering).
2. Sekundärreglering kopplad till elmarknaden.

En tredje komponent som ett reglerbart kärnkraftverk kan leverera är:

3. Lastföljning, dvs. anpassning av effekten till efterfrågan vilket kan vara att minska från 100 % produktion på dagen till 50 % eller mindre på natten.

I listan ovan är det endast den tredje punkten som traditionellt brukar ingripas i begreppet lastföljning. Dock behandlas i detta arbete såväl lastföljning som primär- och sekundärreglering. Genom att lastfölja kan produktionen anpassas till dygnsbehovet.

Primärregleringen i listan ovan sker automatiskt i på förhand dedicerade verk. Idag (2011) sköts denna reglering i Nordel huvudsakligen av infasade vattenkraftaggregat. Den totala tillförda produktionsökningen vid en frekvenssänkning till 49,90 Hz är 600 MW i hela Nordelsystemet där Sveriges del (240 MW) ska vara fullt aktiverad inom 30 sekunder.

Sekundärregleringen är en manuell upp- eller nedreglering vilken kan aktiveras för en aktörs egna behov eller på uppdrag av Svenska Kraftnäts balans-tjänst, se SvK [2].

Fr.o.m. den 1 november 2011 sker sekundärregleringen elområdesvis då flaskhalsar finns i systemet vilket innebär att vid flaskhalsbegränsningar i det svenska stamnätet så delas Sverige upp i två eller högst fyra elområden. Under förutsättning att inga begränsningar finns i stamnätet utgörs Sverige av endast ett elområde.

I sammanhanget bör nämnas att produktionen i något av blocken i Ringhals justeras ibland idag (2011) för att balansera den flaskhals som finns i sydvästra Sverige, det s.k. västkustsnittet. Detta sker på begäran av Svenska Kraftnät.

1.4 Rapportens struktur

Genomförandet av detta arbete har i huvudsak skett i två delar.

Del A är en litteraturstudie som syftar till att beskriva var lastföljning idag sker i världen, vilka leverantörer som finns, hur mycket som kan regleras och

om skillnader i teknik är relevant såsom till exempel kok- eller tryckvattenre-aktorteknik, se kapitel 2 och 3.

Del B är en teknisk studie avseende kärnkraftverken. Vilka konsekvenser får lastföljning för anläggningen, vilka delar av anläggningarna påverkas, slitage, hur påverkas komponenter och vilka förändringar av anläggningarna behöver göras? Dessa och andra närliggande frågeställningar beskrivs och diskuteras. Kopplat till detta finns frågeställningar om säkerheten – höjs riskerna och i så fall på vilket sätt? Del B redogörs för i kapitel 4 - 7.

2 Länder med lastföljning i kärnkraftverk

I detta kapitel studerar vi och namnger några länder vilka har erfarenheter från lastföljning i kärnkraftverk. Listan på länder utgör sig inte för att vara fullständig, det finns möjligen ytterligare länder som praktiserar lastföljning i kärnkraftverk. I detta projekt har vi dock inte kunnat finna fler länder än de sex nedan angivna.

Av dessa länder är det framförallt Frankrike som är etablerat inom lastföljning och regelbundet lastföljer sin kärnkraftsproduktion.

2.1 Frankrike

I Frankrike finns totalt 63,1 GW installerad effekt i 58 block kärnkraft varav 63,1 GW i tryckvattenreaktorer och 0,0 GW i kokvattenreaktorer.

En reaktor på 1,75 GW är under uppbyggnad och planeras vara i drift år 2016-2017 (Flamanville 3) och en reaktor på 1,75 GW är under planering (Penly 3).

I Hundt [3] hävdas att man i Frankrike använder 40 kärnkraftsblock för lastföljning.

Normalt körs kraftverk som har hög kapitalkostnad och låg rörlig kostnad med kontinuerlig effekt för baslast. Detta är dessutom det enklaste eftersom effekten inte enkelt kan ändras i kärnkraftverk jämfört med gasturbiner och vattenkraftverk. Frankrikes höga andel kärnkraft, över 75 % enligt WNA [4], ger därför tekniska utmaningar eftersom kärnkraften även måste användas för lastföljning.

Reseaux Transmission Electricité (RTE) är Frankrikes stamnätsoperatör (TSO) och är ett dotterbolag till EdF (Electricité de France) som äger och driver landets 58 kärnkraftverk. Frankrike har det största transmissionsnätet i Europa, bestående av 100 000 km transmissionsledningar och 44 kopplingar till utlandet inkluderande en HVDC-länk till Storbritannien. Frekvens och spänning i nätet styrs centralt men hantering av produktion görs från regionala driftcentraler. På grund av Frankrikes centrala position i Europa så är RTE en viktig TSO på den europeiska elmarknaden och innehar en viktig funktion för att bibehålla det kontinentaleuropeiska stamnätets tillförlitlighet och stabilitet. Av den totala primära regleringskapaciteten i Europa (3200 MW) levererar Frankrike 800 MW.

I Frankrike kontrolleras effekten i tryckvattenreaktorerna med styrtavar och bortillskott i det primära kylvattnet. För att minska påverkan på härden har EdF de senaste 25 åren använt så kallade "grå" styrtavar vilka har en lägre förmåga att absorbera neutroner (lägre vikt ur ett neutronperspektiv) än vanliga styrtavar. Dessa medger en uthållig variation av uteffekten. Se avsnitt 3.2.2 för en översikt i hur man effektreglerar tryckvattenreaktorer.

RTE använder lastföljning för följande tre regleringar:

1. Primärreglering (automatisk frekvensreglering).
2. Sekundärreglering kopplad till elmarknaden.
3. Tertiärreglering och anpassning av effekten till efterfrågan, dvs. minska från 100 % produktion på dagen till 50 % eller mindre på natten.

Enligt ovan styr alltså Frankrikes TSO (RTE) indirekt lastföljningen i franska kärnkraftverk.

Se sektion 1.3 för en genomgång av regleringarna i listan ovan så som de handhas i Sverige.

Frankrikes TSO (RTE) har kontinuerlig översikt över alla franska reaktorer och avgör efter samråd med och optimering av EdF vilka som skall regleras med avseende på de tre olika regleringarna i listan ovan. I RTE:s realtidsstyrning av systemet med avseende på last och prognostiserad efterfrågan ingår även vattenkraft under höglastsituationer och i det koordinerade systemet kan alltså även kärnkraftsflottan lastfölja även om de enskilda reaktorernas möjlighet att bidra till regleringen kan variera med tiden beroende på var de är i driftsäsongen¹.

Primärreglering² görs genom att EdF väljer den optimala inställningen bland de aggregat inom vattenkraft, termisk kraft och kärnkraft som vid tillfället är i drift. Den slutliga inställningen ska motsvara Frankrikes del av den europeiska primärregleringsreserven (800 MW av totalt 3200 MW i det kontinentaleuropeiska systemet).

Sekundärregleringen görs på en längre tidshorisont än primärregleringen och är en automatisk reglering, se AGC nedan, vilken används för att få systemet att återgå till 50,00 Hz samt att även återgå till de kontrakterade gränsflödena till bl.a. intilliggande länder och nationella områden. En vedertagen benämning på hur den automatiska sekundärregleringen sköts i Frankrike är Automatic Generation Control (AGC)³. Detta görs med hjälp av optimering av EdF där de mest lämpade anläggningarna identifieras. De anläggningarna är sedan automatiskt styrda av signaler vilka sänds från RTE som ändrar på anläggningarnas börvärden. Börvärdena ändras tills dess att avvikelser i frekvens från 50,00 Hz (och avvikelser i de kontrakterade gränsflödena till bl.a. intilliggande länder) återgått till noll.

Tertiärreglering används för att få anläggningar att återgå till sina initiala börvärden och är en manuell operation vilken utförs av anläggningsägaren.

Tryckvattenreaktorer har en mycket flexibel produktionsförmåga i början av driftsäsongen; med nytt bränsle och hög reaktivitetsreserv. Men när man kommit till 65 % av den totala driftsäsongen blir reaktorerna mindre flexibla och de kan då ta en allt mindre del av lastföljning. När man kommit till 90 % av driftsäsongen deltar reaktorerna endast i primärregleringen (automatisk frekvensreglering) och man tillåter då endast små eller inga variationer i effekten (förutom när det är nödvändigt av säkerhetsskäl). Så, vid slutet av

¹ Driftsäsongen är ettårig och börjar med revisionen under sommarhalvåret med bl.a. bränslebyte och pågår till nästkommande sommar.

² Kallas i Frankrike för "Frequency-Power control".

³ Kallas i Frankrike för "Frequency-Power secondary control".

driftsäsongen används de varken för lastföljning eller sekundärreglering, endast för primärreglering. Se även avsnitt 3.2.2.

Nya verk i Frankrike byggs enligt krav såsom European Utility Requirements (EUR), se EUR [5], och är i och med det fullt ut konstruerade för lastföljning. För ytterligare information kring lastföljning med tryckvattenreaktorer i Frankrike, se WNA [4].

2.1.1 Slutsats av lastföljning i Frankrike

Frankrike är det land i världen som praktiserar lastföljning av kärnkraftverk i störst grad.

I Frankrike används kärnkraftverk till i stort sett all slags reglering, från primärreglering till lastföljning.

Frankrikes TSO (RTE) styr indirekt lastföljningen i franska kärnkraftverk.

2.2 Tyskland

I Tyskland finns totalt 23,7 GW installerad effekt i kärnkraft varav 14,0 GW i 11 st. tryckvattenreaktorer och 9,7 GW i 6 st. kokvattenreaktorer, se Hundt [3] och WNA [4].

Även om alla reaktorer i drift i Tyskland är konstruerade för att kunna användas för lastföljning används idag endast tre reaktorer för detta ändamål: Unterweser (tryckvattenreaktor), Phillipsburg 1 (kokvattenreaktor) och Neckarwestheim 1 (tryckvattenreaktor). Dessa tre är dock permanent avstängda sedan våren 2011 i och med det tyska avvecklingsbeslutet

I sammanhanget ska nämnas att den tyska regeringen har den 6 juni 2011 godkänt ett förslag som innebär en gradvis avveckling av samtliga 17 tyska kärnkraftverk till år 2022.

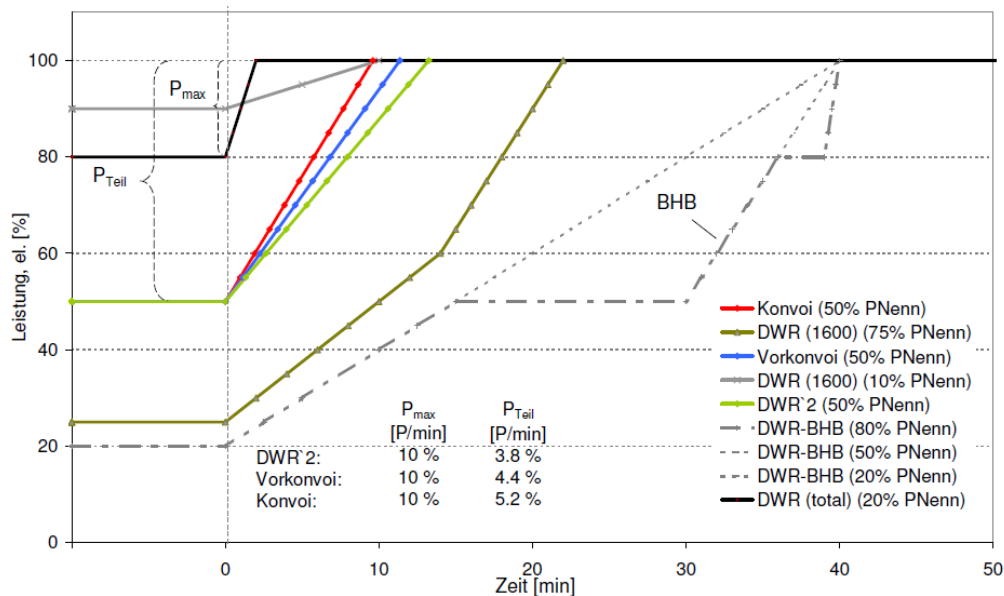
Tabell 2.1: Installerad effekt i tryckvattenreaktorer i Tyskland uppdelat på generationer. Vorkonvoi och Konvoi är reaktortyper levererade av Siemens.

Reaktortyp	Generation	Installerad effekt [GW]
Tryckvattenreaktor (DWR ⁴)	2	4,5
Tryckvattenreaktor (DWR)	2 (Vorkonvoi)	5,5
Tryckvattenreaktor (DWR)	3 (Konvoi)	4,0
Summa		14,0

2.2.1 Lastföljning med tryckvattenreaktorer

Rapporten Hundt [3] framför att man utan stora effektivitetsförluster kan använda 50 % av tryckvattenreaktorers kapacitet för lastföljning. Reglering under 50 % kan leda till temperaturgradienter och termiska spänningar.

⁴ Tyska förkortningen DWR = Engelska förkortningen PWR = Tryckvattenreaktor

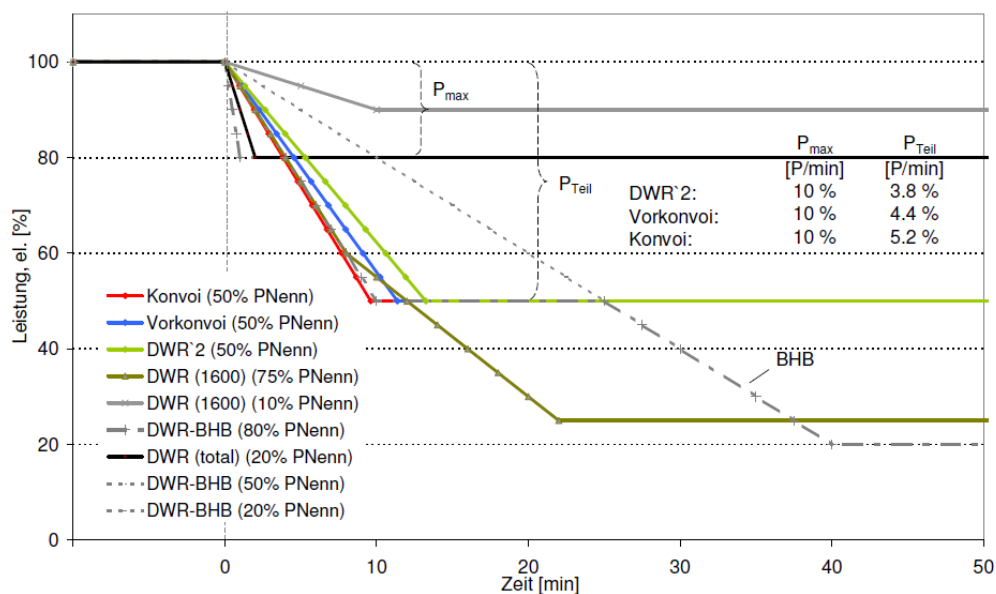


Figur 2.1: Effektökningskapacitet i tyska tryckvattenreaktorer

I Figur 2.1 visas de olika reaktortyperna DWR 2, Vorkonvoi, Konvoi samt DWR (1600) vilken är nästa generations Arevakonstruerade EPR, se kapitel 3.3.3. DWR-BHB är i drift enligt den tyska drifthandboken Die jeweiligen Betriebshandbücher (BHB) der Anlagen, se Hundt [3]. I figuren visas reglerbarhet från olika minimieffekt.

I Figur 2.1 visar svart linje att från 80 % upp till full effekt kan man med den totala parken gå med en takt på 10 % per minut och från 50 % till full effekt med en takt på mellan 3,8 och 5,5 % per minut (röd, blå och grön kurva). Det vill säga man kan med god marginal öka den totala parkens produktion från 50 % till full effekt inom 15 minuter.

I Figur 2.1 finns också nästa generations 1600 MW kärnkraft (DWR(1600)) (mörkgrön och grå heldragen) och den går från 90 % till full effekt på 10 minuter och från 25 % till full effekt på 20 minuter, alltså något långsammare men med större reglerområde jämfört med befintliga tryckvattenreaktorer. Grå streckad linje visar reglerförmåga för DWR-BHB enligt den tyska drifthandboken BHB för tryckvattenreaktorer.



Figur 2.2: Effektminskningskapacitet i tyska tryckvattenreaktorer

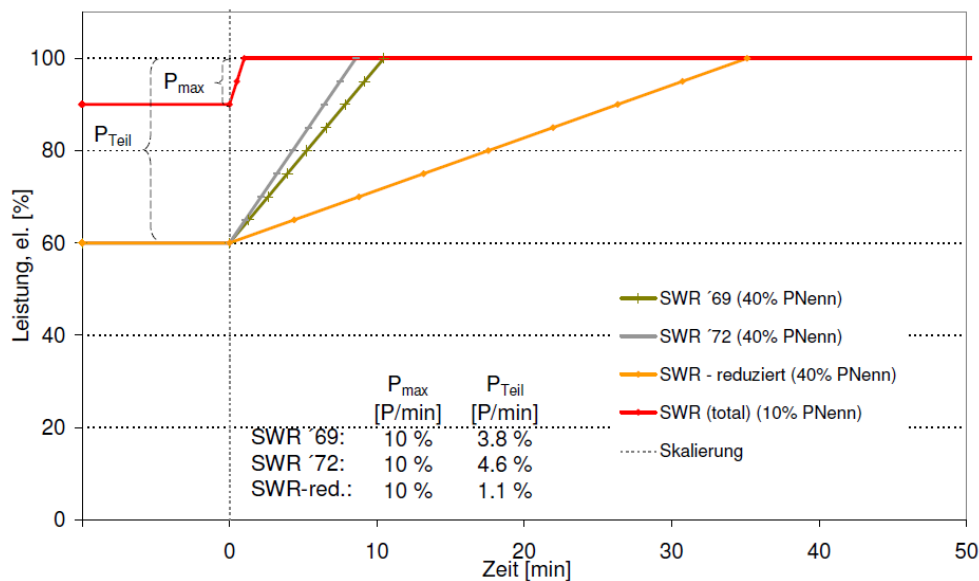
På motsvarande sätt visas i Figur 2.2 produktionsminskning per tidsenhet för tyska tryckvattenreaktorer.

I Figur 2.1 och Figur 2.2 kan vi se att upp- och nedreglering sker med samma ramphastighet, såväl för de olika teknikerna som för hela den tyska kärnkraftsparken.

2.2.2 Lastföljning med kokvattenreaktorer

I Tyskland finns totalt 9,7 GW installerad effekt i kokvattenreaktorer. Reglerbarheten för dessa är något mindre än för tryckvattenreaktorer. Reglerområdet sägs vara 40 % av maxlast dvs från 60 % till 100 %.

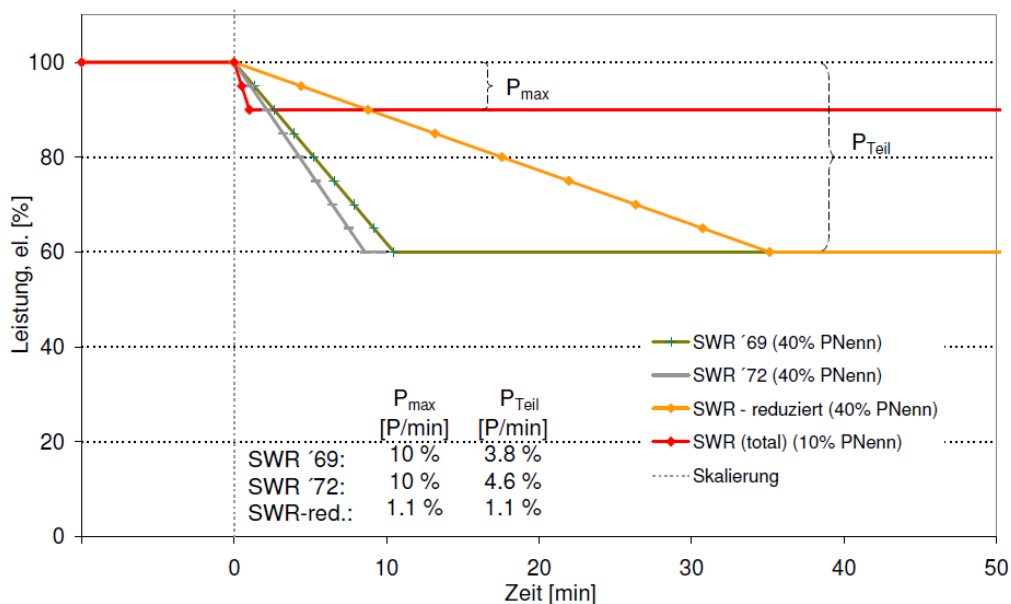
I Figur 2.3 visas effektökningskapaciteten för kokvattenreaktorer. SWR är förkortningen för kokvattenreaktor (Siede Wasser Reaktor).



Figur 2.3: Effektökningskapacitet i tyska kokvattenreaktorer

I Tyskland delar man upp kokvattenreaktorer i två grupper; generation 69 (SWR '69) (mörkgrön i Figur 2.3) och generation 72 (SWR '72) (grå i Figur 2.3), där reglerbarheten från 60 % skiljer sig något men för båda kan full effekt nås inom 10 minuter. Effektökningstakten varierar mellan 3,8 och 4,6 % per minut.

Snabb reglering kan erhållas med de sista 10 % dvs från 90 % till 100 % av effekten där man kan erhålla 10 % per minut (SWR (total)) (röd linje i Figur 2.3). I Hundt [3] nämns emellertid problem med skadade bränslestavar vilka kan leda till att man måste reducera lastföljningskapaciteten ner till 1,1 % per minut vid reglering i hela registret från 60 % och uppåt, se (SWR reduziert) (orange i Figur 2.3).



Figur 2.4: Effektminskningskapacitet i tyska kokvattenreaktorer

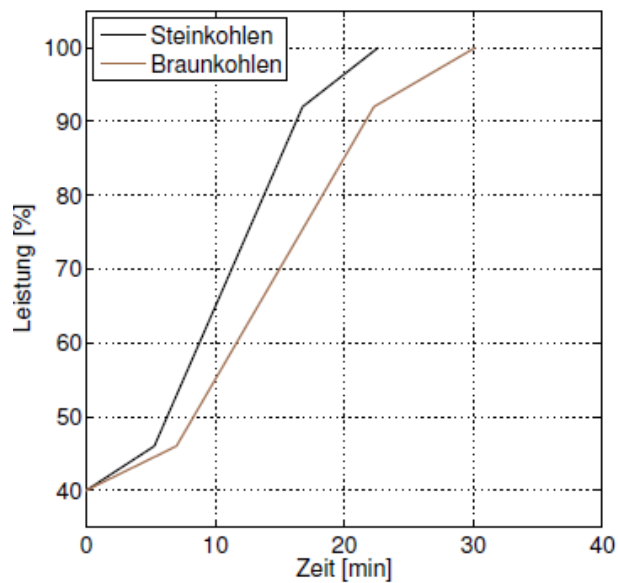
Gradienterna för minskning av effekten hos kokarvattenreaktorer skiljer sig inte från ökning. Detta gäller såväl för generation 69 (SWR '69) (mörkgrön i Figur 2.4) och generation 72 (SWR '72) (grå i Figur 2.4) som för problem med skadade bränslestavar (SWR reduziert) (orange i Figur 2.4).

Snabb reglering kan erhållas med de första 10 %, dvs. från 100 % till 90 % av effekten där man kan erhålla 10 % per minut, se (SWR (total)) (röd linje i Figur 2.4) vilket är samma hastighet som för effektökningen i Figur 2.3.

2.2.3 Slutsats av lastföljning i Tyskland

Slutsatsen man gör i Hundt [3] är att man i Tyskland har tillgång till en reglereffekt på 9,6 GW från kärnkraft vilken kan regleras med en hastighet på mellan 3,8 och 5,2 % av märklaster per minut. Dessutom kan man reglera reaktorerna från 80 % (tryckvattenreaktorer) eller 90 % (kokarvattenreaktorer) med en hastighet på 10 % av märkeffekt per minut.

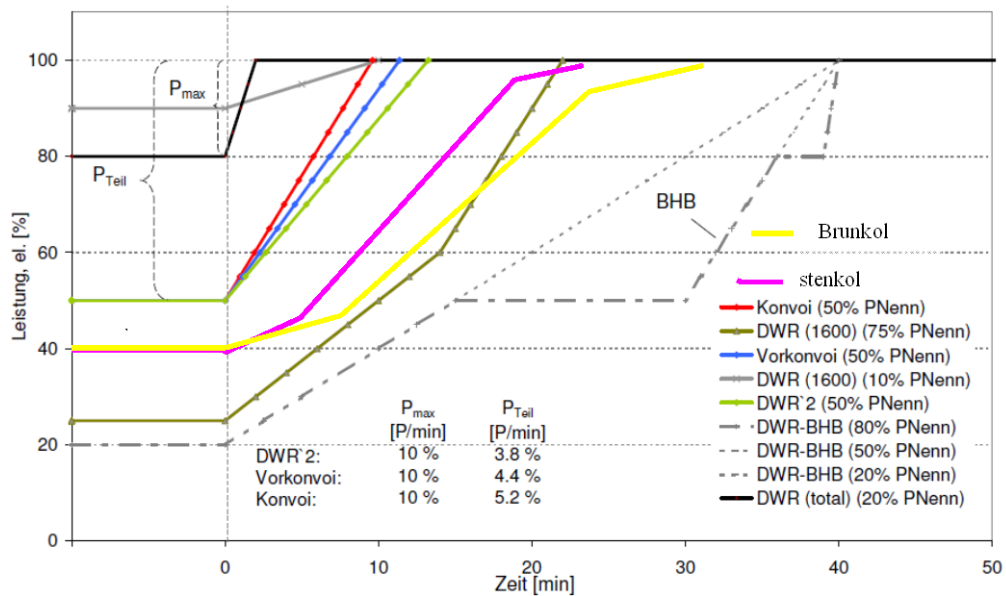
I Hundt [3] visas även kolkraftverks uppregringstider; stenkolkraftverk har hastigheten ca 4 % per minut och brunkolkraftverk har 3 % per minut i förändringskapacitet, se Figur 2.5.



Figur 2.5: Reglerbarhet i kolkraft (stenkol respektive brunkol)

I Figur 2.6 är reglerbarheten för sten- och brunkolkraftverk (från Figur 2.5) inlagd i figuren för uppreglerbarhet av tryckvattenreaktorer (från Figur 2.1).

I Figur 2.6 kan man se att kärnkraften är lika snabb eller t.o.m. snabbare än sten- och brunkolkraftverk på att öka effekten.



Figur 2.6: Jämförelse mellan sten- och brunkolkraftverk och tryckvattenreaktorer (kombination av Figur 2.5 och Figur 2.1)

2.3 USA

I USA finns totalt 101,0 GW installerad effekt i kärnkraft varav 67,0 GW i 69 st. tryckvattenreaktorer och 34,0 GW i 35 st. kokvattenreaktorer, se WNA [4].

Enligt Prince [6] finns det i delstaten Illinois totalt 11,4 GW installerad effekt i kärnkraft varav 6,7 GW i 7 st. kokvattenreaktorer (General Electric) och 4,7 GW i 4 st. tryckvattenreaktorer (Westinghouse) vilka används för lastföljning under variationer såsom natt, veckoslut och vid större helger. Anledningen till lastföljningen med Illinois' kärnkraft är att så mycket som hälften av delstatens elproduktion kommer från kärnkraft och vid så hög andel måste den följa lasten.

I projektet har vi ej funnit referenser till att det någon annanstans i USA finns lastföljande kärnkraftverk.

2.4 Japan

I Japan finns totalt 44,6 GW installerad effekt i kärnkraft varav 19,3 GW i tryckvattenreaktorer och 25,1 GW i kokvattenreaktorer. Dessutom finns en prototypreaktor i Monju vilken motsvarar 0,2 GW. Dessa uppgifter gäller efter Fukushima-händelsen den 11 mars 2011. Före Fukushima-händelsen fanns 47,5 GW installerad effekt i japansk kärnkraft.

År 2010 svarade kärnkraften för nästan 30 % av Japans totala elproduktion (29 % år 2009). Det har funnits planer på att öka den japanska kärnkraften till 41 % år 2017 och 50 % år 2030. Efter Fukushima-händelsen den 11 mars 2011 har dock planerna för utbyggnad av japansk kärnkraft skjutits på framtiden.

År 2008 producerades 1085 TWh el i Japan varav 30 % från kol, 25 % från gas, 24 % från kärnkraft, 11 % från olja och 7,5 % från vattenkraft. Under detta år var dock 8 GW kärnkraft nedstängd på grund av kontroller efter en jordbävning år 2007.

Det har varit svårt att hitta några konkreta fakta som tyder på att lastföljning sker i Japan men en rapport om styrning av det japanska kraftnätet indikerar att det sker i begränsad omfattning, se Nakata [7].

2.5 Sydkorea

I Sydkorea finns totalt 18,7 GW installerad effekt i kärnkraft varav 18,7 GW i tryckvattenreaktorer och 0,0 GW i kokvattenreaktorer.

Idag består Sydkoreas elproduktion till 40 % av kärnkraft. År 2020 beräknas den bli 56 % då 14,2 GW ny kärnkraftskapacitet kommer att ha tagits i drift, se WNA [3].

Det har varit svårt att hitta några konkreta fakta som tyder på att lastföljning sker i Sydkorea men en rapport om styrning av sydkoreanska anläggningar indikerar att det sker i begränsad omfattning, se Na [8].

2.6 Sverige

I Sverige finns totalt 9,1 GW installerad effekt i kärnkraft varav 2,9 GW i 3 st. tryckvattenreaktorer och 6,2 GW i 7 st. kokvattenreaktorer, se WNA [3].

Samtliga tryckvattenreaktorer är placerade i Ringhals medan kokvattenreaktorer finns i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals.

Enligt Svenska Kraftnäts (stamnätsoperatör i Sverige) föreskrift SvKFS 2005:2 "Driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar" [9] kap. 5 ska en tryckvattenreaktor kunna regleras med 5 % per minut i effektområdet 60-90 % av märkeffekten. En kokvattenreaktor ska enligt föreskriften kunna regleras med 10 % per minut i effektområdet 60-90 % av märkeffekten. Att anläggningarna kravmässigt skall klara vissa förändringar i last framgår även av verkens säkerhetsredovisningar, SAR.

Reaktorerna i både Ringhals, Oskarshamn och Forsmark har använts för dygns-, helg- och periodreglering under främst 80- och 90-talet. Ringhals 2 byggdes med dellånga styrtavlar för snabb och automatisk primärreglering, dessa plockades dock bort innan anläggningen togs i drift, Fredlund [10].

I Sverige har man inte utövat primärreglering i något block och inte heller använt gråa styrtavlar vilka används i Frankrike. Effekten regleras istället med en kombination av dels styrtavsläge för båda reaktortyperna och huvudcirkulationspumparna för kokvattenreaktorerna eller borsyrakoncentrationen och reaktorkylvattentemperaturen för tryckvattenreaktorerna. Effekten har justerats ned i Ringhals och Forsmark under perioder med lägre efterfrågan såsom under nätter och över helger. Även Oskarshamn har reglerat ner effekten över helger.

Det har förekommit att den svenska kärnkraften dygnsreglerats, främst på 80-talet. Under våtår⁵ 1998-2000 period- och helgreglerades relativt stora volymer kärnkraft. Att dygnsreglering inte längre förekom 1998-2000 beror på att dygnsreglering ansågs markant påverka slitaget, Persson [11].

På sommaren drivs ofta reaktorerna med "icke-färskt" bränsle. Bränslet kan då inte leverera full effekt, men reaktorn fortsätter producera el i syfte att spara bränslekostnader, s.k. *coast down*. Det var framförallt under perioder med *coast down*-drift som kärnkraftverken tidigare effektregerades.

Det är inte önskvärt att lastfölja med en tryckvattenreaktor vid slutet av en driftsäsongen, se kapitel 3. Man använde sig främst av kokvattenreaktorerna för lastföljning under perioder med *coast down*-drift.

Svenska Kraftnät kan idag besluta om att reglera ner Ringhals med runt 200 MW på en kvart för att balansera västkustsnittet.

⁵ Med våtår menas mycket god tillgång till vattenkraft, detta inträffar ca var 7-8 år.

2.7 Sammanfattning av länder med lastföljning i kärnkraftverk

I detta kapitel har vi nämnt fyra länder vilka med säkerhet har praktiserat lastföljning av kärnkraftverk. Av dessa länder är det framförallt Frankrike som är etablerat inom lastföljning och regelbundet lastföljer sin kärnkraftsproduktion.

Vi har visat att kärnkraftverk i Sverige har lastföljt under 80- och 90-talet i form av dygns-, helg- och periodregleringar.

I kapitlet har vi visat att det finns både lastföljande tryckvatten- och kokvattenreaktorer i världen.

I Frankrike används kärnkraftverk till i stort sett all slags reglering, dvs. primärreglering, sekundärreglering, tertiärreglering och lastföljning.

Upp- och nedreglering kan ske med samma ramphastighet, såväl för de olika teknikerna som för hela kärnkraftsparken i Tyskland.

Vi har visat att kärnkraften är lika snabb eller t.o.m. snabbare än sten- och brunkolkraftverk på att öka effekten.

3 Kartläggning av tekniken

I detta kapitel kartlägger vi tekniken kring lastföljning för kok- och tryckvattenreaktorer. På många sätt är förutsättningarna för effekthereglering av de två typerna desamma. Det finns dock vissa skillnader som vi tittar närmare på.

Även en genomgång av fem tillverkare av tredje generationens kärnkraftverk finns med, där deras olika sätt att reglera nämns.

3.1 Effekthereglering i kärnkraftverk

Kärnkraftverk utnyttjas oftast som baslast, dvs. anläggningen producerar då sin märkeffekt och används optimalt enligt utformarens beräkningar.

I kontrast till baslastläget kan flexibel produktion användas. Effekten måste då kunna regleras, antingen som primärreglering, sekundärreglering eller som den långsammare lastföljningen. Oftast varierar effekten med 1-2 % per minut men effekten kan ändras med upp till 10 % per minut över ett begränsat effektområde, se IAEA [12].

Det finns olika system för att reglera reaktiviteten i en reaktor. Systemen fyller två funktioner, dels kan de användas för att reglera den producerade effekten och dels används de för att trygga reaktorsäkerheten. Pouret och Nuttall [13] listar fem olika sätt att reglera reaktiviteten i en reaktor:

- Ändra mängden klyvbart material i reaktorn.
- Ändra neutronläckaget från reaktorn.
- Ändra primärkylmedlets flödeshastighet.
- Ändra mängden neutronabsorption inuti reaktorn.
- Avsiktligt införa neutronabsorberande material i reaktorn.

Det sista tillvägagångssättet är vanligt vid effekthereglering i kärnkraftverk. Exempel på kraftiga neutronabsorbatorer är ämnen som bor, kadmium, hafnium och gadolinium. Ett vanligt sätt att använda dessa neutronabsorbatorer är som styrstavsmaterial. Dessa styrstavar förs sedan in i härden för att kontrollera reaktiviteten. Styrstavar används i både kok- och tryckvattenreaktorer för reglering, främst vid uppstart och avstängning. Stavarna används även för att kompensera för bränslets utbränning i en kokvattenreaktor och för att snabbstoppa både kok- och tryckvattenreaktorer vid hastiga störningsförlopp.

Generellt är det lättare att justera effekten hos reaktorn ju fler styrstavar den har. Just möjligheten till snabb primärreglering (automatisk frekvensreglering) ökar betydligt om antalet styrstavar ökas. Man pratar ofta om "svarta" och "gråa" styrstavar där de svarta styrstavarna används främst då man vill att kedjereaktionerna ska upphöra. De gråa styrstavarna absorberar inte alla neutroner som passerar styrvastaven vilket ökar möjligheten till effekthereglering. Gråa styrstavar används för primärreglering i Frankrike. I Sverige an-

vänds inte kärnkraft till primärreglering och det finns inte heller några gråa styrtavlar i svenska kärnkraftverk.

Om enbart styrtavlar används för att reglera reaktiviteten kan neutronflödesfördelningen bli ojämn, utbränningsgraden av bränslet kan minska och även mekaniken som används för att manövrera styrtavarna slits ut. Flera av dessa svårigheter uppstår eftersom primärreglering involverar väldigt många stavrörelser med liten amplitud (upp till flera hundra rörelser om dagen).

Införandet av styrtavlar skapar dessutom effektskillnader mellan den nedre och övre delen av reaktorn och genererar en ojämn axiell xenonkoncentration som kan vara svår att hantera.

Xenonuppbyggnad

Grundämnet xenon bildas till följd av kärnklyvningsreaktionerna i härden. En av de vanligaste isotoperna som bildas vid klyvning av uran är jod-135, med halveringstiden 6,6 timmar. Isotopen sönderfaller i sin tur till xenon-135. Halveringstiden för xenon-135 är 9,1 timmar och slutprodukten efter sönderfallet har ingen påverkan på reaktiviteten i härden. Xenon-135 bildas alltså främst indirekt via sönderfall av jod-135, men även direkt i kärnklyvningsreaktionerna. Eftersom xenon skapas efterhand när jodkärnorna sönderfaller så är xenonkoncentrationen i härden fördröjd i förhållande till en ändring i reaktivitet. Isotopen har en ovanligt hög förmåga att absorbera termiska neutroner, man brukar därför kalla ämnet för ett "neutrongift" och man pratar om xenonförgiftning i härden. Genom neutronabsorptionen förbrukas isotopen och förvandlas till den stabila isotopen xenon-136. Xenon-135 skapas och förbrukas kontinuerligt under drift. Efter runt 40 timmars märkeffektdrift av en reaktor uppnås jämviktsförgiftningen. Ett typiskt jämviktsvärde på det negativa reaktivitetsbidraget till följd av xenonförgiftning är mellan två och tre procent. Xenonuppbyggnad kan medföra lokala neutronflödesstörningar, inkluderande små områden med förhöjt neutronflöde, vilket kan äventyra reaktorns stabilitet.

Det är viktigt att ta hänsyn till mängden xenon i härden när man planerar att ändra effekten. Även om effekten justeras på annat sätt än med hjälp av styrtavarna så kommer xenonkoncentrationen, och därmed neutronförgiftningen, att släpa efter vid en effektförändring. En effektminskning kommer att leda till en initial ökning i xenonkoncentration och därmed förstärks minskningen i effekt. Det är extra viktigt att ta hänsyn till xenonhalten i härden mot slutet av driftsäsongen⁶. Då kan kedjereaktionen nätt och jämnt upprätthållas och xenontillväxten efter en effektminskning kan hindra kedjereaktionen från att ta fart igen, om man åter vill gå upp i effekt. Det kan vara så att man tvingas vänta tills stora mängder xenon förbrukats innan man kan gå upp i effekt igen.

⁶ Driftsäsongen är tiden från ny härdladdning till revisionsstart och är knappt ett år. Härden laddas om med delvis nytt bränsle en gång per år (i samband med den årliga revisionen).

3.2 Skillnader på hur kok- och tryckvattenreaktorer effektregleras

Det finns vissa specifika skillnader vid effektreglering i kok- och tryckvattenreaktorer vilka beskrivs i detalj nedan. I Sverige finns det sju kokvattenreaktorer, varav tre är placerade i Oskarshamn, tre i Forsmark samt en i Ringhals. I Ringhals finns även tre tryckvattenreaktorer. Mer än 60 % av världens kärnkraftsel kommer från tryckvattenreaktorer och i Frankrike, vilket är det land med mest erfarenheter från lastföljande kärnkraft, kommer all kärnkraftsel från tryckvattenreaktorer.

3.2.1 Effektreglering i en kokvattenreaktor

Primärkylvattnets temperatur ändras aldrig i en kokvattenreaktor. För att minska antalet transienter som rörstudsarna utsätts för är vattentemperaturen alltid 260°C in i reaktortanken och 280°C ut ur densamma, se Figur 3.1. Även trycket hålls konstant på 70 bar. En kokvattenreaktor effektregleras främst med hjälp av;

- Huvudcirkulationspumpar
- Styrstavsplacering

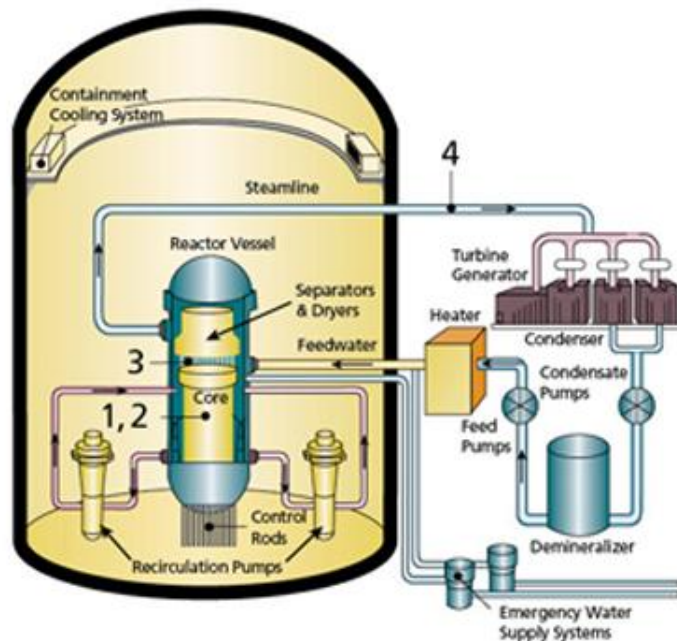
Det är möjligt att lastreglera en kokvattenreaktor mycket snabbt eftersom effekten kan justeras ner till runt 60-70 % av märkeffekten med hjälp av huvudcirkulationspumparna (se "Recirculation Pumps" i Figur 3.1). För att minska effekten minskas då flödeshastigheten på vattnet som cirkulerar genom cirkulationspumpsystemet. På så sätt ökar mängden ånga i härden och därmed minskar vattnets förmåga att bromsa neutronerna och reaktiviteten, vilket får till följd att effekten minskar. Effektförändringshastigheten kan vara så hög som 1 % per sekund i det övre effektområdet (70-100 % av märkeffekten).

Den önskade effekten i en kokvattenreaktor kan justeras antingen via varvtalsreglering eller med direkt effektreglering. Vid varvtalsreglering styrs huvudcirkulationspumparnas varvtal från kontrollrummet. Vid direkt effektreglering anpassas varvtalet för att hålla en från kontrollrummet angiven effektnivå. Vid normal drift används direkt effektreglering där reaktoreffekten automatiskt regleras för att hålla ett förinställt börvärde i effekt, det vill säga leverera en viss önskad och stabil effekt ut på nätet.

I det lägre effektområdet från omkring 30 % till 70 % av märkeffekten kan förändringshastigheten vara 3-5 % per minut. Effekten justeras då med både huvudcirkulationspumpar och styrstavar. Styrstavarna tillverkas ofta i borkarbid och i en kokvattenreaktor finns två olika grupper av styrstavar; reglerstavar och stoppstavar. Stoppstavarna används endast för snabbstopp. Reglerstavarna dras ut ur härden, i olika grupper, i takt med att härdens reaktivitetssinnehåll minskar. I slutet av driftsäsongen är alla reglerstavar ute.

Lastföljning i en kokvattenreaktor måste regleras med hänsyn till möjliga bränsleskador, se IAEA [12]. Vid för stora effekttransienter kan "pellet-cladding interaction" (PCI) eller på svenska "växelverkan kuts-kapsling" inträffa. Detta innebär att kapslingens och bränslekutsens material beblandas. Ett annat oönskat resultat vid plötsliga effektförändringar är torrkokning i kyl-

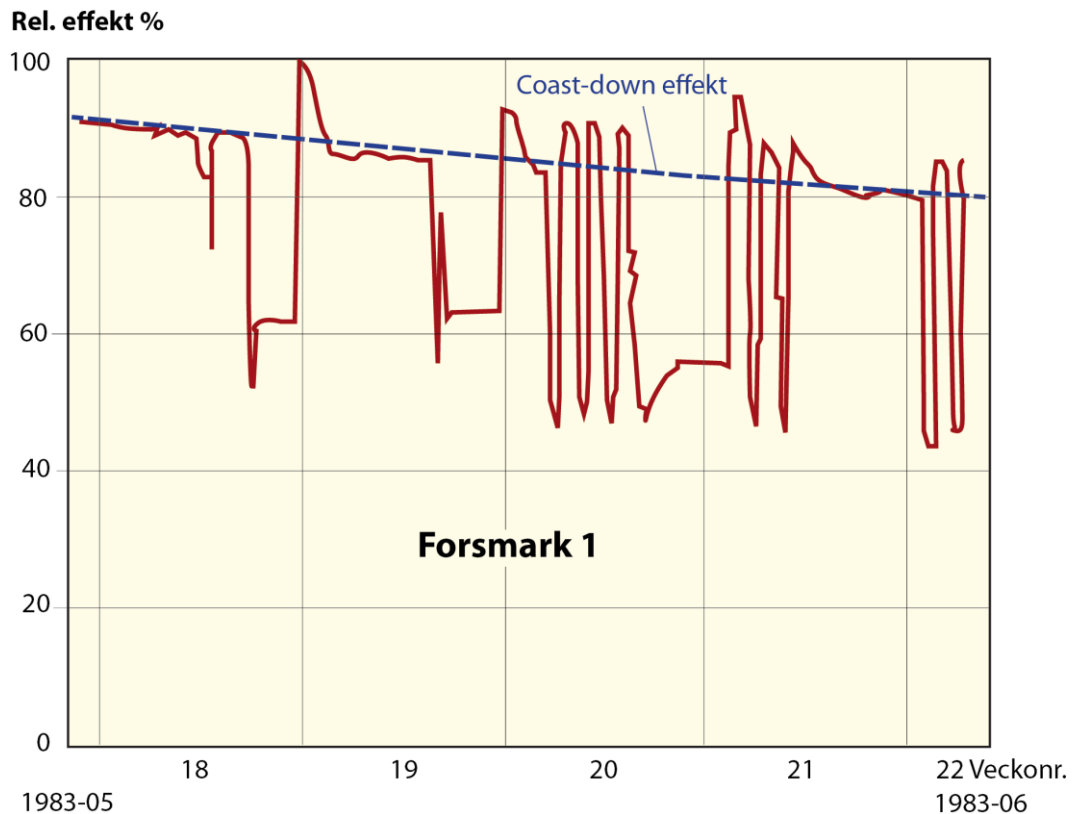
vattenkanalen. Detta innebär att det sammanhängande vattenskiktet mellan ytan och det huvudsakligen ångformiga kylmedlet kokat bort. Det finns då en ökad risk för bränsleskador. Mer om effektregeringens påverkan på anläggningen finns att läsa i kapitel 4.



Figur 3.1: Kokvattenreaktor, källa: U.S. NRC

Kokvattenreaktorerna i Forsmark användes för lastföljning med hjälp av huvudcirkulationspumparna och styrstavsplacering under 80- och 90-talet. Figur 3.2 visar hur effekten ändrades i Forsmark 1 på grund av varierande elefterfrågan under lastföljning i maj 1983. I figuren är *coast-down* kurvan markerad, vilket är den maximala effekten reaktorn kan ge vid stationär drift i slutet av driftsäsongen. Reaktoreffekten avtar med omkring 0,5 % av aktuell effekt per dygn. Effektopparna över *coast down*-kurvan beror på xenonförbränningen vid snabba effektoppgångar.

I Figur 3.2 ser man sju tydliga dygnsregleringar (tidsmässigt korta sänkningar av effekten till ca 50 % under natten) samt tre helgregeringar (tidsmässigt längre sänkningar till ca 60 %).



Figur 3.2: Effekten i Forsmark 1 under maj månad 1983, källa: Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB, (KSU) [14].

Primärreglering

Från början var det tänkt att reaktorns effektregeringssystem även skulle kunna primärreglera mot elnätets frekvens i de svenska kärnkraftverken. Bland annat Forsmark 1, 2 och 3 samt Ringhals 1 och Oskarshamn 1 var tänkta att kunna frekvensreglera automatiskt och reglerformen kallades för frekvenskompensering. Med frekvenskompensering regleras reaktoreffekten för att hjälpa nätet med frekvenshållningen. Reaktoreffekten regleras här med huvudcirkulationspumparna vilket medför att generatorns effektbörvärde ökas (om nätfrekvensen sjunker) resp. minskas (om nätfrekvensen ökar), se [15]. Regleringen av generatorns effektbörvärde sköts automatiskt av en turbinregulator. Själva regleringen utgörs sedan av att regulatorn hela tiden försöker kompensera för avvikelsen mellan den uppmätta frekvensen på nätet och regulatorns förinställda frekvensbörvärde.

Omkoppling från effektregering till frekvenskompensering möjliggjordes med en driftformsenhet i kontrollrummet och övergången mellan de två reglermoderna var tänkt att ske stötfritt. Systemet kom dock aldrig att användas då det under provdriften av anläggningarna visade sig att denna driftform orsakade okontrollerbara effektpendlingar varför vidare användning inte tilläts.

Utrustningen har idag plockats bort på de flesta anläggningarna, bland annat för att minska risken för felgrepp i kontrollrummet.

3.2.2 Effektregering i en tryckvattenreaktor

En tryckvattenreaktor effektregeras främst med hjälp av;

- Styrstavsplacering
- Reaktorkylvattentemperatur
- Borhalt

Tryckvattenreaktorer har möjlighet till lastreglering i spannet från 15-30 % upp till 100 % av märkeffekten. Effektförändringshastigheten är normalt mellan 1 och 3 % per minut, men hastigheter upp till 10 % per minut är möjliga inom begränsade effektområden, se IAEA [12].

En tryckvattenreaktor har inga huvudcirkulationspumpar. Effekten från en tryckvattenreaktor justeras istället med hjälp av styrstavarnas placering, kylvattentemperaturen i reaktortanken och borhalten i vattnet enligt listan ovan. I en tryckvattenreaktor dras samtliga styrstavar ut ur härden i samband med driftstart. Istället för att kompensera bränslets utbränning med styrstavar, som i en kokvattenreaktor, är det borhalten i primärkylmedlet som justeras efterhand som bränslet konsumeras. Styrstavarna kan dock användas vid effektförändringar under hela driftsäsongen.

Reaktorkylvattentemperaturen regleras bl.a. med hjälp av reaktiviteten i härden, matarvattenpumpar och reaktorkylpumpar (se "Reactor Coolant Pumps" och "Feed Pumps" i Figur 3.3).

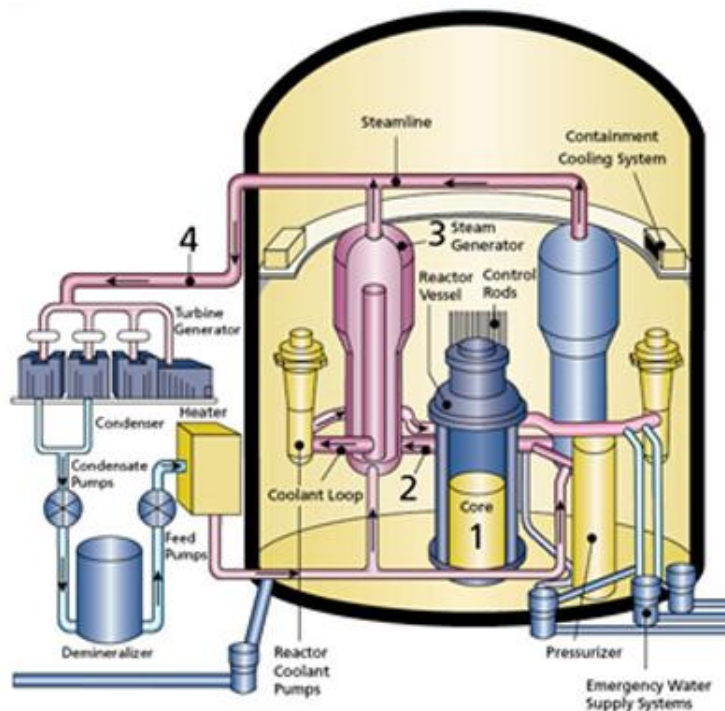
I en tryckvattenreaktor är primärkylmedlet inte i kontakt med turbinen och därför är det lättare att tillföra olika ämnen i reaktorkylvattnet. Det är bland annat därför som man ofta adderar bors i kylmedlet hos en tryckvattenreaktor. Boret absorberar neutroner, vilket medför att reaktiviteten i härden minskar och därigenom även reaktorns producerade effekt. Borsyra används ofta i kombination med styrstavar för att jämna ut effektfördelningen och undvika en ojämn koncentration av xenon i härden. Nackdelen med att använda borsyra för neutronflödesreglering är att metoden är dyr för daglig reglering eftersom borhalten i vattnet senare måste minskas om reaktiviteten ska ökas igen. Detta medför att stora mängder vatten måste processas, se nedan. Dessutom har borsyrasystemet en viss fördröjning och går därför inte att använda, utan hjälp av styrstavsplacering, vid primärreglering (automatisk frekvensreglering).

Borsyra används, förutom för lastföljning, även för att motverka lokala områden av xenonförgiftning i härden som kan uppstå vid normal drift.

Reglering av borhalten i primärkylmedlet

I reaktorernas systembeskrivning för borsystemet finns beskrivet hur reaktiviteten i reaktorerna kan ändras med hjälp av borhalten. Till exempel utformades borsystemet på Ringhals 4 för en lastföljningscykel om 12 timmar på full effekt, 3 timmar ramp ner till 50 % effekt, 6 timmar vid 50 % effekt och en 3 timmars ramp upp igen till 100 % effekt. Det är möjligt till 85 % av driftsä-

songen [16]. I systembeskrivningen nämns även hur reaktoroperatören kan genomföra lastföljning med hjälp av borsystemet.



Figur 3.3: Tryckvattenreaktor, källa: U.S. NRC

Borhalten i primärkylmedlet följer bränslets utbränning. Vid full effekt i början av driftsäsongen är borkoncentrationen runt 1000 ppm för att mot slutet av driftsäsongen vid utbränd hård gå ner till 0 ppm.

Det finns olika tekniker för att minska borhalten. Borkoncentration kan regleras genom att ett flöde tappas av från reaktorkylkretsen till boråtervinnings-systemet. Motsvarande volym borsyrablandning eller vatten tillförs samtidigt i reaktorkylkretsen. Allmänt gäller att de vattenmängder som går till boråtervinnings-systemet vid ökning av borkoncentrationen är små jämfört med vad som utgör restprodukt vid utspädning.

För att åskådliggöra vattenförbrukningen kan följande räkneexempel antas. Om man utgår ifrån att driftsäsongens längd är 300 dygn och att man i början av driftsäsongen har en borkoncentration på 800 ppm är kontinuerlig lastföljning möjlig tills borkoncentrationen är nere på 200 ppm. Vilket då skulle uppnås efter 200 dygn. Med borevaporatorernas kapacitet skulle det då förbrukas 9000 m³ vatten [17]. Borevaporatorerna har till uppgift att behandla det reaktorkylvatten som tappas av vid utspädning av borkoncentrationen. Slutprodukten efter avdunstningsprocessen i evaporatorerna utgörs av borsyra och kondensat. Borsyran kan återanvändas om den uppfyller de kemiska kraven. Om inte skickas den till avfallsanläggningen för ingjutning. Om hela årsproduktionen i tidigare räkneexempel måste tas om hand för ingjutning rör det

sig om 250 m³ borsyra. Kondensatet kan återanvändas eller tappas till utsläppskanalen beroende på kvalitet.

Nyare tryckvattenreaktorer, från 80-talet, använder sig av modernare borsystem som möjliggör reglering av borkoncentrationen genom en temperaturberoende jonbytesprocess. Fördelen med detta tillvägagångssätt är att inga evaporationsbassänger behövs för att rena vattnet från bor.

Problem som kan uppstå i samband med lastföljning, eller effektändring i en tryckvattenreaktor, är lokal växelverkan mellan kuts och kapsling (PCI) samt även möjligtvis "*departure from nucleate boiling*" (DNB) eller på svenska "uppnående av kritisk yteffekt". Detta innebär att ångbubblor bildas på ytan av bränslestavarna. Ångbubblorna stannar på ytan och stoppar därmed kylflödet. Ångan isolerar på så sätt vattnet från den varma ytan och kan leda till bränsleskador.

Mot slutet av en driftsäsong, vid coast-down drift, är det däremot svårare att lastfölja en tryckvattenreaktor än en kokvattenreaktor. Reaktoreffekten i en tryckvattenreaktor avtar med ungefär 0,6-0,7 % av aktuell effekt per dygn under den här perioden. Framförallt är det lastföljning med hjälp av borsyra som blir svårare att genomföra. Borhalten går alltid att öka snabbt i en tryckvattenreaktor (d.v.s. att minska effektproduktionen), men att minska borhalten, för att återgå till märkeffekten, går betydligt långsammare. Detta gäller speciellt vid slutet av en driftsäsong då borhalterna vid normaldrift är låga. En minskning av borkoncentrationen i detta läge till följd av lastföljning ger mycket långa behandlingstider av reaktorkylmedlet eller, beroende på anläggningskonstruktion, förbrukning av stora mängder vatten som senare måste renas.

Primärreglering

När effekten justeras i en tryckvattenreaktor ställs generatoren in på en effekt och reaktorn ställer sedan in sig därefter (bland annat genom att styrstavslägena ändras). Det är därför möjligt att använda en tryckvattenreaktor vid primärreglering (automatisk frekvensreglering), detta eftersom uteffekten då kan ändras utan fördröjning. Vid primärreglering är det framförallt styrstavslägena som justeras för att ändra effekten.

Kapaciteten att primärreglera en tryckvattenreaktor är densamma under hela driftsäsongen. I en tryckvattenreaktor är det även möjligt att genomföra primärreglering med en förändring av turbinpådraget. Detta eftersom det finns ånggeneratorer (se "Steam Generator" i Figur 3.3) i en tryckvattenreaktor, vilket innebär att det finns mer energireserver, än i en kokvattenreaktor.

Primärreglering på Ringhals 2, 3 och 4

På en tryckvattenanläggning är reaktorn "slav under turbinen" varför frekvensreglering här möjliggörs med en frekvensregulator som utgör en del i turbinregleringen [10]. Regulatoren är inställd på att reagera på förändringar som är större än +/- 0,5 Hz. Om frekvensen på nätet går utanför detta område, dvs. över 50,5 Hz eller under 49,5 Hz kommer regulatoren att styra turbinens reglerventiler så att den producerade effekten därmed justeras.

Denna driftform används dock normalt inte, då blocken är avsedda att användas som baslast.

Om blocken skulle användas för primärreglering skulle denna driftform innebära att transientbudgeten till stor del utnyttjades, se kapitel 5. 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.

3.3 Generation III+

De kärnkraftsreaktorer som idag finns tillgängliga på marknaden tillhör vad man kallar generation III eller III+. Det bör förtydligas att det inte finns någon exakt definition av skillnaden mellan generationerna III och III+.

Vissa skillnader går dock att urskilja mellan de kommersiella reaktorer som är i drift idag och går under beteckningen generation II och de nya generation III.

För att klassas som Gen III bör följande kriterier vara uppfyllda:

- En teknisk livslängd på minst 60 år.
- Minskad risk för härdsmläta.
- Inga operatörsingrepp bör krävas inom 72 timmar efter en inledande händelse.
- Anläggningen skall tåla en träff från ett stort passagerarplan utan risk för radioaktiva utsläpp.
- Vissa Europeiska myndigheter kräver att anläggningen skall vara utrustad med en så kallad "core catcher" som skall "fånga" härden om den skulle smälta genom reaktortanken.

I viss utsträckning strävar man också efter att utnyttja så kallade passiva system, vilka förlitar sig på naturlagar som gravitation för sin funktion, istället för att förlita sig på aktiva system vilka normalt kräver kraft i form av t.ex. elektricitet.

De första generation III-reaktorerna anses ha byggts i Japan av Hitachi (GE) och Toshiba trots att de inte uppfyller alla kriterierna ovan. De är så kallade Advanced Boiling Water Reactors (ABWR), av dessa finns två i Kashiwazaki (Kashiwazaki 6 och 7) samt en i Hamaoka (Hamaoka 5) i Japan.

Nya reaktorer har mycket gemensamt med sina föregångare. En väsentlig skillnad är dock att alla nya anläggningar har skydds- och reglersystem vilka bygger på digital teknik, till skillnad från nuvarande, äldre anläggningar vars system bygger på analog teknik. Generellt gäller också att nya anläggningar har stor förmåga till lastföljning, vilket exemplifieras i nedanstående sammanfattning över några nya anläggningar och deras möjligheter till lastföljning.

3.3.1 AP1000 (Westinghouse, tryckvattenreaktor)

Generellt anger Westinghouse [18] att deras AP1000-anläggning klarar följande laständringar utan att reaktorn snabbstoppas:

- $\pm 5 \%$ per minut ramp laständring mellan 15 % och 100 % effekt.
- $\pm 10 \%$ steg laständring mellan 15 % och 100 % effekt.

- 100 % helt lastbortfall.
- 100-50-100 % daglig lastföljning över 90 % av driftsäsongen.
- 20% steglasterändring inom tio minuter.
- Anläggningen skall även klara att primärreglera med motsvarande 10 % av märkeffekten med 2 % per minut.

Enligt Westinghouse klarar anläggningen detta bland annat genom utnyttjning av så kallade "grå styrtavar" och på så sätt minskas behovet att förändra borkoncentrationen i reaktorsystemet, se avsnitt 3.2.2.

Dessa "grå styrtavar" är bortsett från deras lägre förmåga till neutronabsorption identiska med vanliga styrtavar. Användningen av "grå styrtavar" leder till att den mängd aktivt vatten som måste "processas" minskas, vilket i sin tur förenklar utformningen av ett antal system då vissa delar inte längre behövs som t.ex. indunstare, pumpar, ventiler med mera. Med "processas" menas här t.ex. att vattnet inte behöver passera jonbytarmassor för att renas från aktivitet.

3.3.2 APWR (Mitsubishi, tryckvattenreaktor)

En APWR är enligt Mitsubishi Heavy Industries (MHI), utformad så att reaktorns reglersystem automatiskt skall klara ändringar mellan 15 % och 100 % effekt. Normalt regleras reaktorns kylvattentemperatur enligt ett förprogrammerat värde vilket ökar linjärt med turbinens uteffekt.

Reaktorns reglersystem är konstruerat så att följande laständringar är möjliga utan att reaktorns snabbstopp inträffar:

- Från 0 till 15 % under 30 minuter
- Från 15 % till 0% på fem minuter.
- 10 % steglasterändring, inom effektområdet 15 % till och med 100 % effekt.
- lastförändring (ramp) med 5 % per minut inom lastområdet 15 % till 100 % effekt.
- 100 % lastbortfall (husturbinövergång).

Listan ovan återfinns i US-APWR [19], kapitel 3.9.1.1.1.

Med avsikt att kunna göra lastförändringar planeras en APWR kunna göra följande last/frekvensförändringar:

- Daglig lastföljning 100 % - 50 % - 100 %.
- Primärreglering (automatisk frekvensreglering) med upp till 5 % av nominell effekt.

Enligt World Nuclear News, se WNN [20], planeras två APWR vid Tsuruga, i Japan, med konstruktionsstart år 2012 och driftsättning år 2017-2018. Efter Fukushima-händelsen den 11 mars 2011 kan dessa datum dock komma att ändras.

3.3.3 EPR (AREVA, tryckvattenreaktor)

Tryckvattenreaktorn EPR har till största delen utformats av AREVA i Frankrike, med bistånd från AREVA:s tyska verksamhet. Dagens franska reaktorer har god förmåga till lastföljning vilket faller sig naturligt då mer än 75 % av dagens elproduktion i Frankrike utgörs av kärnkraft, se sektion 2.1.

AREVA anger att EPR skall ha ännu bättre förutsättningar till lastföljning än dagens franska anläggningar, se U.S. EPR [21].

Nedan följer en sammanfattning av vad AREVA anger skall vara möjligt med en EPR i fråga om lastföljning.

- Lastföljning: upp till 5 % per minut mellan 100 % till 60 % och tillbaka till 100 % effekt, anläggningen skall klara detta dagligen.
- Kopplat till den förra punkten skall anläggningen klara att gå från 100 % till 25 % med 5 % per minut och från 25 % till 60 % med 2,5 % per minut.
- Primärreglering: (lokal) frekvenskontroll inom bandet $\pm 2,5$ % (stegförändring) av nominell effekt (gäller USA där frekvensen är 60 Hz).

En mer omfattande beskrivning kring EPR:s olika möjligheter till lastföljning (vilka förefaller vara stora) finns i referens U.S. EPR [21].

3.3.4 ABWR (Toshiba, kokvattenreaktor)

ABWR har förmåga till all form av reglering, se ABWR [22], som t.ex. primärreglering (automatisk frekvensreglering), sekundärreglering (kopplat till handel) samt lastföljning (väsentligen effektsänkning under natten). Detta genom att anläggningens reglersystem kan styras så att reaktorns produktion av ånga motsvarar efterfrågan från turbinen. Inom området 65 % till 110 %:s flöde är ändringshastigheten ca 1 % per sekund och detta görs genom att ändra kylmedelflödet i reaktorn, vilket påverkar reaktiviteten.

Under 65 % av märkeffekten är ändringshastigheten ca 2,5 % per minut och detta görs genom ändring av styrtavarnas position.

3.3.5 ESBWR (GE-Hitachi, kokvattenreaktor)

Enligt uppgift klarar ESBWR följande:

Daglig lastföljning med hjälp av styrtavar (det finns inga huvudcirkulationspumpar i ESBWR) mellan 100 % och 50 % av full effekt med följande timcykler, 14 timmar-1 timme-8 timmar-1 timme, med en ramphastighet om ± 1 % per minut, se GE-Hitachi [23].

4 Påverkan på anläggningen

I det här kapitlet diskuterar vi vilken påverkan som förväntas på anläggningen till följd av reglering av producerad effekt. Vi tittar närmare på vilket slitage som förväntas på dels primärsidan och dels sekundärsidan av reaktorn. I primärsidan ingår härden med bränsle, interndelar såsom styrväxelmekanik och reaktortanken. Sekundärsidan av reaktorsystemet består av bland annat turbin, generator och kondensor.

Utredningar genomförda av Vattenfall på 80-talet hävdar att daglig lastföljning inte påverkar anläggningens (Forsmark 1 och 2) livslängd förutsatt att följande gränser inte överskrids [25]

- Daglig effektändring på max 30 % av aktuell effekt
- Lägsta reaktoreffekt 35 %
- Lägsta turbineffekt på någon turbin 50 %
- Laständringshastighet 1 % per minut rekommenderas (max tillåtet 20 % per minut)

Erfarenheter från driften på de svenska kärnkraftsanläggningarna visar dock att övergång från ett driftläge till ett annat, som kräver insats av utrustning och personal, medför risker som ökar störningsfrekvensen. En av orsakerna till att man är ovillig till effektregering på kärnkraftverken är att om driften påverkas medför det stora utgifter. Det är alltid en ökad risk för driftstörning i samband med effektförändringar. Detta då utrustning och komponenter inte alltid beter sig som de är avsedda att göra (till exempel en ventil som inte uppför sig som den ska). Detta ökar risken för reaktor- respektive turbintripp och påverkar därmed anläggningarnas tillgänglighet och slitage. Med tripp avses störning som leder till att reaktor eller turbin helt eller delvis plötsligt stoppas. Att produktionsreglering sannolikt påverkar den framtida produktionsförmågan framgår av avtal som slutits mellan de olika delägarna i svenska kärnkraftverk. Till exempel finns det en överenskommelse om att en viss kostnad utgår per MW och reglertillfälle för den delägare som väljer att reglera ner produktionen. Enligt avtalet är anledningen till att man tar ut en kostnad i samband med reglering en ökad risk för driftstörningar och därmed anläggningstransienter. Man hävdar också, enligt överenskommelsen, att långvarig större reglering påverkar anläggningarnas livslängd eftersom dessa körs utanför optimerade konstruktionsförutsättningar. Detta påverkar därmed anläggningarnas tillgänglighet och slitage. På tryckvattenreaktorerna med speciella borsystem installerade för effektregering används vid lastföljning dessutom fler system än vid drift med konstant effekt. Det är därför viktigt att ha uppdaterade och fungerande instruktioner och rutiner för kontrollrumspersonalen samt kunskap om hur lastföljningen påverkar anläggningarna. Därmed blir det lättare att förutsäga var slitaget i anläggningen kan uppstå till följd av lastföljning samt slitagets dignitet.

Enligt tillverkarna av reaktor och turbin för de svenska kärnkraftverken så var det tänkt att stationerna från början skulle drivas som baslastverk med möjlighet att under senare delen av deras livslängd kunna utnyttjas för lastfölj-

ning. Vilket då skulle innebära ett begränsat antal effektreduceringar per år. På 80- och 90-talet när kärnkraftverken ibland reglerade effektproduktionen i förhållande till elefterfrågan fanns fortfarande ett beslut om avveckling av kärnkraften till år 2010. Då antog man en livslängd för ett kärnkraftverk på runt 30 år och hade relativt stora marginaler mot transientbudgeten. I dagsläget är förutsättningarna för den befintliga kärnkraften i Sverige annorlunda. Avvecklingsbeslutet är upphävt och många kärnkraftsägare hoppas på en livslängd för ett svenskt kärnkraftverk på uppåt 50-60 år. Olika moderniseringar har genomförts på kärnkraftverken för att klara ett långt liv. Förutsättningarna för lastföljning i kärnkraftverk förändras också genom det pågående effekthöjningsprogrammet där stora delar av anläggningarna byggs om och många komponenter byts ut.

Kärnkraftsägarna vill inte på något sätt försämra möjligheterna för en lång livstid för anläggningarna. Det driftsätt som effekttreglering medför kommer dock att ha en negativ effekt på livslängden bland annat i form av en snabbare utmattnings (snabbare åldring) av stålmaterial. Vi vet i dagsläget inte tillräckligt om åldringen i stålmaterial för att kunna göra en exakt bedömning av dess påverkan på livslängd. Vi vet dock att effekt- och temperaturförändringar accelererar åldringen.

Det antal transienter som tillåts för reaktorns interndelar beräknas i transientbudgeten, se kapitel 5. Reaktortanken tillåts ha en viss mängd transienter enligt transientbudgeten, när budgeten är slut kan den räknas om, vilket kan leda till ett högre antal tillåtna transienter eller så måste reaktortanken bytas ut. Detta görs i regel inte, utan kärnkraftverket avvecklas då istället. Det är vid lastföljning således extra viktigt att kunna göra en korrekt bedömning av tryck- och temperaturgradienter.

4.1 Anläggningsslitage och påverkan på primärsidan

Utifrån påverkan på primärsidan i reaktor så är det viktigaste att tänka på vid lastföljning framförhållning. Det går fort att gå ner i effekt, men att öka effekten igen tar längre tid. Detta beror bland annat på xenontillväxten, se kapitel 3.1 och de restriktioner som finns för att undvika bränsleskador i samband med reaktivitetsökning. Om effektuppgången planeras före nedgången i effekt så kan minskningen genomföras så att bästa utgångsläge inför uppgången erhålls. Det är alltså inte möjligt att beordra ett kärnkraftverk en omedelbar effektminskning på 50 % för att sedan meddela att man vill ha full effekt igen en timme senare. Normalt tar det runt åtta till 10 timmar att uppnå full effekt efter att anläggningen körts vid reducerad effekt under en viss tid. I värsta fall kan det ta ett eller ett par dygn att uppnå full effekt igen. Lastföljning i kärnkraftverk måste planeras i förväg. Vid varje planerad effektförändring räknar hård fysiker på reaktiviteten inför en effektuppgång. Detta medför extra kostnader i form av arbetstid.

Förutom att stålmaterial i reaktortanken och interndelarna i reaktor åldras snabbare vid flera effektförändringar så påverkar driftsättet även bränslet på olika sätt.

4.1.1 Utökade säkerhetskrav på bränslet

Om kärnkraften används för lastföljning kommer det att ställas ökade säkerhetskrav på bränslet. Inför laddningen av en reaktor måste bränslets egenskaper anpassas så att reaktorsäkerhetsmarginaler upprätthålls för bränslets integritet (täthet) vid såväl stationär drift som under olika störningsförlopp. I Frankrike där lastföljande kärnkraft är vanligt har man till exempel ett säkerhetskrav för något som kallas "extended low power operation" (ELPO). Kravet innebär att reaktorn ska kunna producera 20 % av sin märkeffekt under lång tid för att sedan snabbt öka effekten igen, utan bränsleskador. Den franska motsvarigheten till Strålsäkerhetsmyndigheten, Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), ställer krav på att bränslet ska klara en transient i samband med en effektförändring från 20 % till 100 %. Det som kan hända om effekten, och därmed reaktiviteten, ökar snabbt i reaktorn är att bränslekutsen orsakar sprickning i kapslingen så att en kapslingsskada uppstår. Vid normal drift skapas radioaktiva gasformiga ämnen i kärnklyvningarna. Dessa sipprar ut från kutsen, men hålls kvar i bränslestaven med hjälp av kapslingen. Bränslekutsen utvidgas mer än kapslingen när de blir varma och detta kan göra att kutsen orsakar sprickning i kapslingen och att de radioaktiva gaserna läcker ut i primärkylmedlet. Denna typ av bränsleskada kallas "pellet cladding interaction" (PCI).

I Frankrike finns kravet på att bränslet ska klara effekttökningar från 20 % till full effekt i samband med en transient på 18 %, d.v.s. till 118 %, utan att PCI-skador uppstår. I Sverige, som normalt inte använder sig av lastföljande kärnkraft, finns inte motsvarande krav från Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) på att bränslet ska klara sig utan PCI-skador under transienter i samband med effektoppgångar. Bränslets anrikning har liten påverkan till möjligheterna att använda kärnkraften som lastföljande. Färskt bränsle ökar däremot risken för en PCI-skada, eftersom reaktiviteten kan bli större. Då mängden klyvbart material i bränslestaven är större så kan reaktivitetsförändringen och den påföljande temperaturgradienten bli större.

4.1.2 Bränsleekonomi

Bränslet utnyttjas inte på ett optimalt vis om kärnkraftverkets produktion varierar. I Sverige laddas härden med färskt bränsle i mitten av härden vilket varje år flyttas radiellt utåt. Det leder till en hög effektutveckling centralt i härden och en lägre effekt utåt randen. Bränslets utbränning blir på detta sätt optimal. Vid lastföljande kärnkraft laddas härden för en plattare (jämnare) radiell effektfördelning. I Frankrike, där kravet finns på en anläggning att klara effektoppgångar från långtidsdrift runt 20 %:s effekt fås inte samma utbränningsgrad av bränslet som om bränsleladdningen optimeras för drift med konstant märkeffekt. För en viss anrikningsgrad medför ett lastföljande driftsätt tiotals procent i ökade bränslekostnader. De extra bränslekostnaderna som blir till följd av en lägre utbränningsgrad kan dock minskas om man planerar för lastföljningen när man planerar en ny bränslekonfiguration, vilket sker minst ett och ett halvt år i förväg. Om dessutom bränsleinköpet ska optimeras för lastföljning krävs en framförhållning på ytterligare minst ett och ett halvt år, det vill säga totalt tre års planering i förtid. Merkostnader i form av bränsleekonomi vid lastföljande kärnkraft blir större desto kortare framför-

hållning man har. En annan effekt av den lägre utbränningsgraden är att det blir en större mängd använt kärnbränsle, per kWh, som måste slutförvaras.

Om det finns påvisade bränsleskador i en reaktor begränsas möjligheterna till effektförändringar då man vet sedan ungefär 10 år tillbaks att de skadade stavarna kan utveckla svåra sekundärskador, även vid små förändringar i temperatur.

4.1.3 Bränslets licensiering

I dagsläget inbegrips inte lastföljning i bränslets licensiering. Om man vill använda lastföljande kärnkraft måste driftsättet analyseras och licensieringen uppdateras. Det tar tid och det medför en extra kostnad på omkring 100 kSEK per uppdaterad licens. Licensieringen utförs av bränsletillverkarna (till exempel Westinghouse eller Areva). Det måste bland annat verifieras att systematiska utmattningsskador på kapslingsmaterial ej kan förekomma.

4.1.4 Härdövervakning

I de svenska kokvattenreaktorerna mäts neutronflödet i härden kontinuerligt för att ha kontroll på reaktiviteten. Det tas även prover på primärkylmedlet som analyseras med avseende på vattenkemin några gånger i veckan. I dessa prover kan eventuella bränsleskador upptäckas. Dessutom mäts halten av radioaktivitet i vattnet kontinuerligt med detektorer, i system med bland annat reningsfilter, för upptäckandet av en plötslig stor bränsleskada.

Vid de svenska tryckvattenreaktorerna är härdövervakningen inte lika rigorös. Det är tänkbart att en utförligare härdövervakning är önskvärd, i båda reaktortyperna, om antalet effektförändringar ökar i samband med lastföljning. Areva har utvecklat ett automatiskt härdövervakningssystem som verkar online för att motverka PCI-skador.

4.1.5 Påverkan på reaktorsidan till följd av primärreglering

Vid primärreglering i området $\pm 5\%$ av märkeffekten så blir medeleffekten i reaktorn 95 %. Det innebär att 5 % av bränslet aldrig kommer att utnyttjas om reaktorn bränsleladdats på vanligt sätt, vilket motsvarar tiotals miljoner SEK. Dock får man ersättning för att tillhandahålla primärreglering, dessutom kan härden optimeras för primärreglering om så önskas. Då borde de extra bränslekostnaderna vara mindre. Primärreglering förväntas ha en liten påverkan på anläggningen i form av risker för nya bränsleskador eller effekttransienter som påverkar utmattningen av reaktortanken. Om det däremot redan finns en dokumenterad bränsleskada kan den dock utvecklas även vid så pass små effektförändringar som primärreglering medför. Det franska energibolaget EDF lär dock ha haft problem med sprickbildning i konstruktionsmaterial till följd av primärreglering.

Ett större hinder för att kunna primärreglera är Strålsäkerhetsmyndighetens krav på utredning till att kärnkraftverkets producerade effekt styrs automatiskt från en signal från det yttre elnätet, se kapitel 7.2.2. Dessutom blir det en ny situation för kontrollrumspersonalen om reaktorns producerade effekt

styrts automatiskt. Joachim Bende, FKA, jämför med att sitta bakom ratten i en bil med ett automatiskt styrsystem.

4.2 Anläggningslitage och påverkan på sekundärsidan

Anläggningslitaget på sekundärsidan till följd av lastföljning har tidigare utretts på både Forsmark och Ringhals. Eftersom turbinanläggningarna på kokvattenreaktorerna Forsmark 1 och 2, samt tryckvattenreaktorerna Ringhals 2, 3 och 4 har mycket stora likheter, se [25]-[26], kan slitageeffekterna behandlas gemensamt för dessa block.

De flesta av våra svenska reaktorer har två turbinsträngar, med en högtrycksturbin och tre lågtrycksturbiner vardera. Det är möjligt att helt enkelt dumpa ångan helt eller delvis i kondensorn och på så sätt ändra effekten ut på elnätet. Det ökade slitage som uppstår på turbinen i samband med en lägre turbinlast, vilket gäller vid delvis dumpdrift, beskrivs nedan. Om man dumpar all ånga från en turbinsträng uppstår ett ökat slitage på kondensorn. Om det är önskvärt att regelmässigt ändra den producerade effekten från ett kärnkraftverk så bör reaktiviteten i reaktorn ändras, istället för att ångan dumpas.



Figur 5.1: Ny lågtrycksturbinrotor i Forsmark

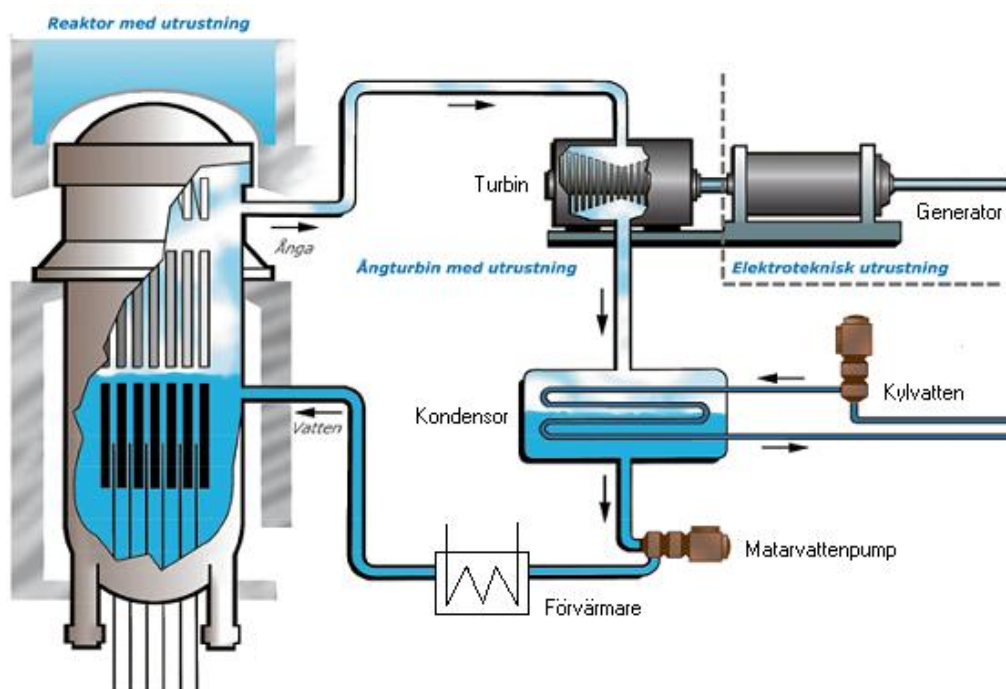
4.2.1 Slitage till följd av lägre turbinlast

Anläggningsdrift med reducerad reaktoreffekt innebär att ångtrycket mot turbinerna blir lägre varför lasten på turbinerna också blir lägre. Slitage i form av erosion minskar på turbinerna med minskad last. Detta då fukthalten i ångan minskar med lasten [27]. Vid en turbinlast runt 30 - 50 % och lägre (beroende på anläggning) kommer dock fukthalten i ångan att stiga. Anledningen till detta är att tillförseln av ånga till mellanöverhettaren börjar strypas. Mellanöverhettaren har till uppgift att avfukta och överhettas ångan. Den

stigande fukthalten vid låga turbinlaster borde dock inte orsaka några problem med anledning av då rådande ångdata. Eftersom turbinerna är konstruerade för vissa ångflöden kan en viss försämring av erosionsförhållandena förväntas på lågtrycksturbinens avloppsskovelar på grund av ogynnsam skovelströmning vid för låga flöden.

En turbinlast på 60 % eller mer orsakar inget onormalt slitage på turbinen. En kraftig verkningsgradsförlust samt ett ökat slitage på diverse komponenter uppkommer först vid en turbineffekt på 30 % [25] - [26]. Turbindrift vid turbinlast under 15 % bör undvikas då det uppkommer ogynnsamma strömingsförhållanden i turbinen vid dessa låga effekter.

Effekthöjningsprogrammet på Forsmark 1 och 2 har inneburit installation av nya högtryckspumpar, som komplement till matarvattenpumparna. Dessa pumpar arbetar enligt en bestämd sekvens där de kopplas ur vid 45 %:s turbinlast för att stoppa vid 20 %. Pumparna startar igen vid 50 %:s turbinlast. Det är bra om man kan slippa stopp- och startmanöver av dessa pumpar till följd av lastföljning då varje manöver ökar risken för störning hos pumparna. En sådan eventuell störning kan göra att pumparna inte startar varför full reaktoreffekt inte kan nås.



Figur 5.2: Schematisk bild av elproduktionen i en kokvattenreaktor, källa: FKA

4.2.2 Slitage till följd av lägre matarvattentemperatur i en kokvattenreaktor

I Forsmark har man studerat hur matarvattentemperaturen påverkar anläggningen. En lägre reaktoreffekt och därmed lägre turbinlast innebär också en lägre temperatur på matarvattnet. Matarvattnet är det vatten som pumpas tillbaka från kondensorn till reaktorn, se Figur 5.2. Reglering ner till 40 %:s turbinlast utgör inga större problem i förändrad matarvattentemperatur. Fortsatt nedreglering gör att temperaturen sjunker fortare för att vid 20 %:s turbinlast sjunka drastiskt då förvärmningen, det vill säga uppvärmningen av matarvattnet delvis kopplas ur. Eftersom inloppsvattnet till reaktorn normalt håller en konstant temperatur på 260°C utgör ett kallare matarvatten en större termisk materialbelastning på bland annat reaktortankens matarvatteninlopp och själva matarvattenledningen inne i reaktorinneslutningen.

Inloppen för matarvattnet i reaktortanken kallas matarvattenstudsar. De är konstruerade så att matarvattnets flöde ger upphov till ejektorverkan kring matarvattenstudsarna. Det krävs ett minsta flöde på matarvattnet för att denna ejektorverkan ska upprätthållas och på så sätt minska temperaturbelastningarna på matarvattenstudsarna. Vid låga reaktoreffekter och därmed låga matarvattenflöden är det därför nödvändigt att leda om flödet till den ena av de två matarvattenledningarna. Eftersom matarvattnets inlopp till tanken är symmetriskt placerade runt reaktortanken kommer detta att innebära en osymmetrisk fördelning av matarvattnet i reaktorn. Hur detta driftsätt under längre tid påverkar tanken och härden med avseende på sned temperaturfördelning är idag (2011) oklart.

4.3 Sammanfattning av påverkan på anläggningen

I detta kapitel har vi analyserat den påverkan på anläggningen som förväntas i samband med en varierad effektproduktion. Kapitlet är uppdelat i påverkan på primärsidan och påverkan på sekundärsidan i reaktorn.

Påverkan på primärsidan består främst av en försämrad bränsleekonomi. Det går dock att minimera försämringen genom att planera lastföljningen innan härden "laddas om" i början av driftsäsongen.

Påverkan på sekundärsidan förväntas vara modest vid långsamma (maximalt 3 % av märkeffekten per minut) effektförändringar ner till max 60 - 70 % av märkeffekten. Vid en turbineffekt under 30 % försämras verkningsgraden på turbinen samt ett ökat slitage på avloppsskovlarna uppkommer.

Sammanfattningsvis förväntas en relativt liten påverkan på både primär- och sekundärsidan vid långsamma (maximalt 3 % av märkeffekten per minut) effektförändringar ner till max 60 - 70 % av märkeffekten. Dock medför varje ändring i den producerade effekten en ökad risk för driftstörning.

5 Transientbudget

5.1 Allmänt

Transientbudgeten tas fram vid konstruktionen av anläggningen och innehåller ett visst antal händelser inom olika händelsekategorier. När anläggningen sedan tas i drift måste kontinuerlig uppföljning ske av att det antal händelser som antagits inom respektive kategori inte överskrids, om detta är på väg att ske måste anläggningens transientunderlag räknas om.

För att säkerställa tillräcklig hållfasthet hos utrustning på anläggningens nukleära sida, ansätts konservativa värden vad gäller frekvens (hur ofta de förekommer) och amplitud för temperatur och trycktransienter, utifrån olika driftfall för anläggningen. (Denna beskrivning täcker anläggningens kylmedelsystem i fråga om tryck, temperatur och flöde, den gäller inte mekaniska laster för någon komponent.) De driftförhållanden som ligger till grund för anläggningens konstruktion baseras till stor del på ingenjörsmässig bedömning och erfarenhet.

Utvalda transienter är representativa händelser vilka endera är tillräckligt utmanande eller frekvent förekommande för att kunna påverka en komponents cykliska beteende. Valda händelser utgör inte alltid en korrekt representation av verkliga driftfall. De skall istället betraktas som konservativa paraplyfall av transienter, vilka utgör grund för utmattningsberäkningar för komponenter och säkerställer att dessa fyller sin funktion på ett säkert sätt under anläggningens antagna livslängd, se nedan.

Anläggningens transienter väljs normalt för att stå i överensstämmelse med den standard anläggningen en gång konstruerades utifrån, för Ringhals 3 och 4, se ANSI [28].

De driftfall som presenteras i denna standard [28], och på något sätt ger signifikant bidrag till de transienter anläggningens kylmedelsystem utsätts för, täcks av det dokument som kallas "Design Transient Specification" (DTS). De flesta transienter beskrivs direkt, medan vissa av liknande natur men mindre allvarliga, representeras av ett så kallat paraplyfall genom att den värsta händelsen behandlas.

Specifikt antal transienter baseras på en antagen livslängd hos anläggningen om 40 år. Det bör understrykas att de transienter som ingår i DTS baseras på konservativa uppfattningar och utgör underlag för beräkning av hållfasthet för komponenter och återspeglar inte i egentlig mening verklig drift av anläggningen.

I transientbudgeten anges alltså ett antal för anläggningen begränsande transienter. Där anges för respektive transient vilka komponenter som påverkas och om påverkan gäller tryck, temperatur eller flöde. Tabell 5.1 visar hur en transientbudget kan vara utformad.

Transientfall	Antal transienter	Primärsystem		Tryckhållare		Ånggenerator Sekundärsida			
		Tryck	Temp	Tryck	Flöde	Ång temp	Mava temp	Ångflöde	Mavaflöde
Normal drift									
Pålastning 5%/min av märkeffekt	2000	Se rapport 1	Se rapport 2	Se rapport 3	Se rapport 4	Se rapport 5	Se rapport 6	Se rapport 7	Se rapport 8
Avlastning 5 %/ min av märkeffekt	2000	-	-	-	-	-	-	-	-
lastökning 10% av märkeffekt	2000	-	-	-	-	-	-	-	-
Stort lastfrånslag med turbindump	200	-	-	-	-	-	-	-	-
Osv...									

Tabell 5.1: Exempel på transientbudget. Ett visst antal transienter är tillåtna för olika transientfall.

5.2 Påverkan vid övergång till regelmässig lastföljning

Om anläggningen skall gå över till mer regelmässig lastföljning måste en genomgång av dess Design Transient Specification (DTS) genomföras. Lastföljningar över veckoslut ner till 60 – 70 % av märkeffekten ryms troligtvis inom existerande transientbudget. Vid mer frekvent reglering av större volymer kan det vara så att transientbudgeten måste uppdateras, vilket är ett omfattande och kostsamt arbete, men fullt genomförbart.

Anläggningsägaren måste göra en uppskattning om hur man tänker driva anläggningen för att säkerställa att den transientbudget som väljs som underlag säkert kommer att täcka in framtida drift av anläggningen.

6 Reglerbarhet i svenska anläggningar

Vilka möjligheter de svenska kärnkraftsanläggningarna har till effektregering beror på vilken form av effektregering man menar samt i vilket effektområde denna ska ske.

6.1 Lastföljning

I såväl Forsmark, Oskarshamn och Ringhals har lastföljning skett, främst under 80-talet. Den lastföljning man då använde sig av var av typen dygns- och veckoslutsreglering, det vill säga relativt långsam reglering vilken planerades i förväg. Samtal med en del av de operatörer som arbetade på anläggningarna vid denna tid visar att lastföljning inte alls utgjorde några driftmässiga problem, förutsatt att effekten ändrades med 1 % per minut samt att effektförändringen höll sig inom 60-100 % av märkeffekten. Erfarenheterna av detta driftsätt visar att större effektnedgångar (dvs. att sänka till under 60 %) orsakar en mer omfattande insats av utrustning och personal vilket ökar risken för störningar. Vidare kunde man se att risken för störningar också ökar ju lägre ner i effekt man gick, då detta utgör ett osäkrare driftläge.

Nedan beskrivs vilken möjlighet de svenska anläggningarna har till att kunna lastfölja samt hur fort regleringen kan ske. Reglerbarhetens beroende på anläggningstyp har också studerats då de svenska kärnkraftverken utgörs av både kok- och tryckvattenreaktorer.

Kokvattenreaktorerna i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals är konstruerade för lastföljning av typen dygns- och veckoslutsreglering, i effektområdet 60-70 % av full effekt. Det vill säga reglering som kan klaras med hjälp av att ändra huvudcirkulationspumparnas varvtal. Reglering inom dessa gränser underlättar också driften för operatörerna då större laständringar medför styrtavsreglering. Effekttändringshastigheten ligger typiskt runt 3-5 % av märkeffekten per minut. Reglerbarheten för tryckvattenreaktorerna i Ringhals är liknande. Effektregering i området 60-70 % av full reaktoreffekt kan åstadkommas med hastigheten 3-5 % av märkeffekten per minut. Xenonförgiftning, se kapitel 3.1, påverkar dessutom markant effektförändringar på över 30 % av märkeffekten.

Enligt tillverkarna av reaktor och turbin var det tänkt att dessa stationer från början skulle drivas som ett baslastverk med möjlighet att under senare delen av deras livslängd kunna utnyttjas för lastföljning, vilket då skulle innebära ett begränsat antal effektreduceringar per år. Dessa förutsättningar har dock förändrats i och med det upphävda avvecklingsbeslutet. Istället vill man idag (2011) förlänga livslängden på anläggningarna och därmed har reaktorsystemen uppgraderats och moderniserats. Förutsättningarna för lastföljning förändras också genom det pågående effekthöjningsprogrammet där stora delar av anläggningarna byggs om och många komponenter byts ut.

Effektens reglerbarhet skiljer sig från anläggning till anläggning beroende på bland annat konstruktion, bränsle- och anläggningstyp samt var i driftsäsongen anläggningen befinner sig.

Det går lika bra att lastfölja med en kok- som en tryckvattenreaktor. En tryckvattenreaktor lämpar sig dock mindre väl för lastföljning mot slutet av driftsäsongen. Tryckvattenreaktorer lastföljs med hjälp av att neutronabsorberande bor tillförs i reaktorkylvattnet. Mot slutet av driftsäsongen är det svårt att öka i effekt igen, efter en nedreglering, eftersom borkoncentrationen då är nära noll vid normaldrift.

Eftersom lastföljning kan komma att utgöra en viktig del inom kärnkraftsproduktionen i framtiden bör nya anläggningar utformas så att de har stor förmåga till lastföljning.

6.2 Primärreglering

Erfarenheter från provdriften av kokvattenreaktorerna i Forsmark och Ringhals visar att frekvenskompensering (primärreglering) inte fungerade tillfredsställande på grund av stora effektpendlingar, varför detta driftsätt kom att förbjudas. Tryckvattenreaktorerna vid Ringhals kan i dagsläget inte regelmässigt användas för primärreglering.

6.3 Vilka förändringar behöver genomföras i anläggningarna?

Vissa av de förändringar som behöver genomföras i anläggningen om man vill använda kärnkraftverket som lastföljande nämns i kapitel 4 "Påverkan på anläggningen". Om lastföljning används rutinmässigt behöver man ladda bränslet i hårdnen i en annan konfiguration. Dessutom är det möjligt att mer hårdövervakning är önskvärt vid detta driftsätt. Flera hård fysiker kommer att behövas för att räkna på reaktiviteten inför en effekttuppgång. Det kan också vara nödvändigt att se över verkens transientbudgetar samt arbetsrutiner för driftpersonal. Utöver detta förväntas inga större förändringar av verken vid lastföljning i effektområdet 60-100 % av märkeffekten. Om däremot de svenska kärnkraftverken ska lastfölja i ett större område än 60-100 % av märkeffekten bör anläggningarna ses över med avseende på dess lämplighet för detta.

De genomförda effekthöjningarna vid de svenska kärnkraftverken har inte påverkat de tekniska möjligheterna till att reglera den producerade effekten. Däremot är viljan hos ägarna att använda kärnkraften som lastföljande troligtvis mindre eftersom stora investeringar lagts på att förlänga livstiden på de befintliga verken. Det är allmänt känt att effektförändringar påverkar utmattningen av stålmaterial och förkortar ett kärnkraftsverks livstid.

Om man vill använda sig av primärreglering i ett kärnkraftverk behöver automatiska reglersystem installeras. I en kokvattenreaktor genomförs primärreglering genom att huvudcirkulationspumparnas varvtal ändras automatiskt. Sådana reglersystem har funnits på Forsmark, systemen har dock tagits bort, eller kommer att tas bort inom den närmaste framtiden. Orsaken var att möjligheten till primärreglering ansågs onödig samt att det ökade risken för fel-

manövrering i kontrollrummet. I en tryckvattenreaktor är det möjligt att genomföra primärreglering med en förändring av turbinpådraget (en tryckvattenreaktor har litet mer energireserver i ånggeneratorerna). Vill man använda sig rutinmässigt av primärreglering i en tryckvattenreaktor går det att installera halvabsorberande "gråa styrtavar" för att jämna ut den axiella effektfördelningen i härden. Reaktortankens lock måste dock bytas ut om man vill installera dessa stavar. Det medför en kostnad på flera hundra miljoner kronor och installationsarbetet sträcker sig över ett antal år. Vilket innebär att det i dagsläget inte är aktuellt att installera sådana styrtavar i de svenska tryckvattenreaktorerna.

Det viktigaste att tänka på om man vill använda kärnkraften lastföljande är framförhållning. Då kan man få bästa möjliga ekonomi i driftsättet och minsta möjliga slitage på anläggningen. Ett tänkbart driftsätt är att använda ett block som planerats för lastföljande och de andra för drift på maximal effekt. Den ekonomiska påverkan på hela kärnkraftsflottan skulle då kunna bli mindre, eftersom effektförändringarna kan planeras långt i förväg. Om alla block används som lastföljande med en framförhållning på mindre än ett år blir troligtvis den totala ekonomin sämre.

Det, eller de block som avsätts för lastföljning kommer dock att bli tvungna att tåla större effektförändringar, jämfört med om alla block lastföljer i ett mindre effektområde.

7 Säkerhetsaspekter

7.1 Lastföljning – för- och nackdelar ur säkerhetsperspektiv

Påverkan på anläggningen till följd av lastföljning är i första hand av underhållskaraktär och därmed med ekonomiska implikationer. När det gäller de direkt säkerhetsmässiga aspekterna är de knutna till reaktordärden. Det finns även en säkerhetsaspekt med möjlig driftstörning på externt elnät. Det är alltså två regelverk som sammanstrålar vid lastföljande kärnkraft, dels nukleära anläggningen och dels elnätsregelverket.

Generation III och III+ är av leverantörerna anpassade för lastföljning ur en teknisk synpunkt. Om det är ekonomiskt lönsamt, ur kärnkraftverkets perspektiv, är tveksamt. Kostnader som kan uppstå på lång sikt med högre underhållskostnader och reinvesteringar är svåra att beräkna. Inoptimal användning av bränsle är en annan ekonomisk nackdel som kan uppstå om nedreglering sker mer än vad som planerats för vid bränsleladdning. Ur säkerhetsmässigt perspektiv är dock dessa kärnkraftgenerationer designade för möjligheten att lastfölja och därmed är säkerhetsmässiga aspekter beaktade så länge lastföljningen håller sig innanför designgränsen.

7.1.1 Reaktorns säkerhetsmässiga förutsättningar för lastföljning

Härdfysik

En begränsning för lastföljning är variationen av xenonkoncentration i reaktordärden. Axiella Xenonoscillationer förorsakas av obalans i den axiella effektfördelningen, se kapitel 3.1. För att inte därden skall bli instabil måste dessa oscillationer hållas inom vissa gränser. Xenonkoncentrationen i olika punkter i därden beror på effektfördelningen. Denna oscillation av xenonkoncentrationen begränsar hastigheten av effektförändring. Den är därför en begränsande ur säkerhetssynpunkt för hur snabbt en lastföljning kan ske.

Bränslekapsling

Lastföljning innebär förändrad värmeutveckling från bränslestavarna. Bränsleoxidens värmeutvidgningskoefficient är högre än kapslingens, se PCI-skador i kapitel 4.1.1. Detta innebär att en ökning av värmeutveckling kan leda till mekanisk nötning mellan bränslekutsarna och kapslingen. Risk finns då för bränsleskador. Därför kan inte lastföljning genomföras med för hög effektförändringshastighet.

Reaktortank

Varje reaktortank har en transientbudget, se kapitel 5, som ligger inom en god marginal för vad den tål i transienter innan den förlorar sitt prestanda som tryckhållande skydd. I reaktortanken finns bassängområden i vilka det uppstår betydande termiska gradienter vid höjda temperaturer på grund av snabb höjning av härdeffekten. Säkerhetsmarginaler för reaktortankspåkänningar avgör hur stora, snabba och ofta effektförändringar kan tillåtas vara.

Reaktorkomponenter

Utmattningsskador kan uppstå även på andra interndelar inuti reaktortanken i högre grad vid snabba effektförändringar. Speciellt om effektförändringar sker med kort tid emellan såsom daglig lastföljning.

Elförsörjning för reaktorns säkerhetssystem

Om lastföljning sker designmässigt olämpligt, så att effekttändringen går utanför säkerhetsmarginalerna för reaktorn, leder den troligtvis till snabbstopp. Vid snabbstopp krävs elförsörjning för säkerhets- och övervakningssystem. Om inte externt elnät finns tillgängligt måste husturbindrift eller reservelförsörjning fungera. Husturbindrift är inte alldeles enkelt att vid alla typer av driftlägen klara av. Reservel i form av dieselgeneratorer testas frekvent så att de alltid är startberedda. Risken för snabbstopp medför dock en liten sannolikhet för felfunktion i reservelmatningen.

7.1.2 Säkerhetsmässiga aspekter knutna till elnätspåverkan

Störning på externt elnät kan tänkas ske om lastföljningen inte fungerar som avsett utan istället slutar med ett snabbstopp. Om detta utgör en stor transient händelse för nätet kan det ge upphov till svårigheter att hålla frekvens med efterföljande nätbortfall. Kärnkraftverk kan störa elnätet vid snabba effekttändringar på grund av kärnkraftprocessens interna krav på balansering av reaktorfysikaliska förlopp. När driftsäsongen kommit över till den sista tredjedelen före bränslebyte, minskar snabbt flexibiliteten för lastföljning. När 10 % av driftsäsongen återstår klaras inte effekttätheten utan bara frekvensreglering av i tryckvattenreaktorer. Om lastföljning är beroende av kärnkraft från tryckvattenreaktorer, måste de reaktorer som ingår i lastföljningsstyrningen ha driftsäsongerna förskjutna så att inte alla hamnar i den moden att de inte klarar av en laststyrning ur nätets synpunkt.

7.2 Aspekter på effekttäthet från Strålsäkerhetsmyndigheten**7.2.1 Lastföljning**

Lastföljning i form av dygns- och veckoreglering har tidigare skett och tillåtit i Sverige och det täcks av dagens regelverk. De normala driftdokumenten styrde de nedregleringar av effekten som de svenska kärnkraftverken genomförde under 1980- och 1990-talet. När de dygns- och veckoreglerade effekten, var det med dåtidens design på kärnbränslet, vilket tilläts av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. Tekniskt har många förändringar skett sedan lastföljningen tillämpades såsom till exempel att effekttätheten i härden idag är större. I och med effekthöjningar de senaste åren har ett för de högre effekterna anpassat bränsle börjat användas. Det innebär andra nivåer och fördelningar av härdeffekten. Driftområdets diagram, som visar den termiska effekten mot huvudcirkulationspumparnas flöde styr hur långt ner och med vilken hastighet som nedreglering av effekten kan ske. Blockens effekthöjningar har påverkat deras driftområden, vilka visar områden där instabila förhållanden i härden kan uppträda.

SSM jämför ansökningar om ändrade driftlägen mot blockens säkerhetsanalyser. Ändå är lastföljning idag ingen fråga som diskuteras av tjänstemännen på SSM på grund av att regelverket tillåter lastföljning och det har inte funnits anledning att se över detta. Skulle dygns- och veckoreglering komma att tillämpas i större utsträckning är det tänkbart att SSM skulle göra en förnyad studie av situationen men det finns idag ingen anledning tro att det skulle beläggas med större restriktioner än idag.

7.2.2 Primärreglering

En helt annan sak är om primärreglering (automatisk frekvensreglering) ska användas. Det skulle innebära att operatörerna överlåter en del av regleringen till automatik. Frekvensreglering har aldrig ingått i driftstyrningen på kärnkraftverken. Knappar för frekvensreglering fanns tidigare på Forsmark, men de har monterats bort eller kommer att monteras bort.

En framtida eventuell primärreglering blir en ny fråga för SSM. En begäran om tillstånd för att tillämpa ett sådant driftsätt skulle utredas noggrant. Då måste man ta in erfarenheter från länder där detta kan ha skett och därefter göra en noggrann analys av förutsättningar för ett sådant tillstånd. Detta är inte självklart okontroversiellt utan kan leda till begränsningar i tillstånden. På en kokvattenreaktor går det att lägga in begränsningar för huvudcirkulationspumparna som säkerhetsmarginal, vilket minskar sannolikheten för lokala xenontransienter i kärnan. Primärreglering har inverkan på kärnans belastning. Anmälda kärndändringar granskas alltid av Strålsäkerhetsmyndigheten.

7.2.3 Sekundärreglering

Sekundärreglering är i Norddelområdet en manuell upp- eller nedreglering som kan aktiveras för en aktörs egna behov eller på uppdrag av SvK:s balans-tjänst. Sekundärreglering meddelas cirka 10 minuter innan reglering skall ske och sker med steg i storleksordningen 10 MW. Om detta inte sker alltför ofta, ses detta av SSM som en vanlig driftändring. Hastigheten som effekten ändras med skall ligga inom anläggningens design. Men om denna typ av reglering förutsätts bli ofta förekommande under ett driftår, så bör man ta hänsyn till detta med en annan bränsledesign vid omladdning av kärnan. Med en hög frekvens av upp- och nedgångar fås xenontoppar i kärnan som måste pareras. Xenon "förgiftar" reaktiviteten genom att neutroner absorberas. Detta minskar styrbarheten av kärnan och xenonkoncentrationen skall därför vara under kontroll. Xenonproduktion och -fördelning blir en begränsning om inte bränsleutformningen är anpassad för denna typ av drift.

7.2.4 Ö-drift

En fråga som angränsar till detta är frågan om tillstånd för ö-drift det vill säga när nätet är isolerat i öar på grund av driftstörningar. Ö-drift kan bli ett fall för frekvensreglering. Normal ö-drift görs med varvtalsreglering i kokvattenreaktorer. Efter ett nätbortfall behövs kärnkraftverken som stöd vid uppbyggnaden av nätets kapacitet igen. Detta är inte reglerat av SSM men diskussioner har förts. SSM ser att detta sker endast som effektregering ur säkerhetssynpunkt.

7.2.5 Lastföljnings påverkan på transientbudget

I samband med lastföljning har transientbudget diskuterats tidigare i kapitel 5. Ur SSM:s synpunkt gäller dessa och påverkas inte av en diskussion om lastföljning. De synar transientbudgeten med hänsyn till en 40-årig prognosperiod. Det är svårt att sätta kvalitativa mått på uppföljningen. Om verken har en noggrann loggning av vad som sker, kan man lättare se om till exempel en värmeökning inneburit en belastning eller ej. Om inte mätvärden finns för närmare analys, räknar man konservativt och drar ifrån händelsen som en belastning från transientbudgeten. En effekttökning av kärnkraftblocken skall inte skapa fler transienter. Blocken har bytt interna delar, vilket minskat belastningen och bidragit till en ökad kvarvarande transientbudget.

7.3 Aspekter på effekthereglering från Svenska Kraftnät

Svenska Kraftnät har inga synpunkter på varken lastföljning eller primärreglering levererat från kärnkraftverk, se Arnborg [29].

7.4 Slutsatser kring Strålsäkerhetsmyndigheten och Svenska Kraftnäts syn på effekthereglering

Sammanfattningsvis är dygns- och veckoreglering troligen något som SSM godkänner och man kommer troligen inte att skärpa regelverket. Däremot kan primärreglering endast bli tillåtet under vissa begränsningar.

Svenska Kraftnät har inga synpunkter på varken lastföljning eller primärreglering levererat från kärnkraftverk.

8 Uppgiftslämnare

Följande svenska referenser har bidragit med viktig information till projektet:

Joachim Bende, Enhetschef Hård- och Bränsle, FKA

Bertil Jonsson, FKA

Roland Jägerstahl, FKA

Yngve Wigervall, FKA

Rune Axelsson, Enhetschef Hård, RAB

Lars Fredlund, Specialist, RAB

Lennart Almquist, Utvecklingsingenjör, RAB

Hans Edvinson, f.d. RAB, numera Areva

Lars Ewald, RAB

Tord Granhäll, RAB

Johan Larsson, Hjärfysiker, RAB

Nils-Erik Nilsson, RAB

Claes Halldin, E.ON Kärnkraft Sverige

Fredrik Heyman, Enhetschef Elteknik/TE, OKG

Sten Ottosson, OKG

Lars Sjögren, OKG

Thomas Rydman, OKG

Stefan Arnborg, Svenska Kraftnät

Jan-Olof Lindhe, Vattenfall AB

Set Persson, Vattenfall AB

Céline Alberts, Vattenfall Nuclear Fuel AB

Torbjörn Espelfelt, Vattenfall Nuclear Fuel AB

Petter Gabrielsson, Vattenfall Nuclear Fuel AB

Alf Ljungblad, Vattenfall Nuclear Fuel AB

Christian Malm, Vattenfall Nuclear Fuel AB

Andreas Lidén, Vattenfall Nuclear Fuel AB

David Schrire, Vattenfall Nuclear Fuel AB

Lars Karlsson, SSM

9 Slutsatser

Det är tekniskt möjligt att använda sig av lastföljande kärnkraft. I Frankrike, som har en relativt stor andel el från kärnkraft (över 75 %), använder man sig rutinmässigt av både långsam och planerad dygns- och veckoslutsreglering (lastföljning) samt primärreglering (automatisk frekvensreglering). Alla 58 reaktorer i Frankrike är tryckvattenreaktorer. I Sverige finns tre tryckvattenreaktorer samt sju kokvattenreaktorer. Det finns inga tekniska hinder för att reglera endera reaktortypen. Kärnkraften i Sverige användes för dygns- och veckoslutsreglering både under 80- och 90-talet. Lastföljningen var då inte rutinmässig och förekom under begränsade perioder med god tillgång på el (våttår). Vattenkraften är den inhemska energikälla som traditionellt används för att balansera elproduktionen i Nordel.

Ett kärnkraftverk vars levererade elektriska uteffekt kan varieras kan leverera ett flertal olika "produkter" till energimarknaden. Dessa produkter utgörs på Nordelmarknaden av:

1. Primärreglering (automatisk frekvensreglering).
2. Sekundärreglering kopplad till elmarknaden.

En tredje komponent som ett reglerbart kraftverk kan leverera är:

3. Lastföljning, dvs. anpassning av effekten till efterfrågan vilket kan vara att minska från 100 % produktion på dagen till 50 % eller mindre på natten.

I och med den planerade utbyggnaden av vindkraften kan behovet av reglerkraft förväntas öka framöver. Nya förutsättningar kan också uppkomma på elmarknaden, liknande den uppdelning i elområden som gäller sedan den 1 november 2011, vilket kan öka behovet av flexibilitet i kraftverkens elproduktion.

Kärnkraftverk används ofta som baslastverk med konstant maximal effektproduktion. Detta eftersom investeringskostnaden är relativt hög och bränslekostnaden relativt låg. Vi tror dock att en ökad framtida efterfrågan på flexibel kraft kommer att göra effektregering av kärnkraft intressant. Nya reaktor-koncept som finns tillgängliga på marknaden har generellt en god förmåga till flexibel effektproduktion.

Påverkan på kärnkraftsanläggningen till följd av varierande effektproduktion förväntas vara relativt liten. Speciellt om regleringen sker långsamt (maximalt 3 % av märkeffekten per minut) och håller sig inom 100 till 60 – 70 % av märkeffekten. De flesta svenska kärnkraftverk är utformade för en effektproduktion omkring 1 GW. Om man håller sig inom dessa gränser förväntas inget nämnvärt ökat slitage på anläggningens olika delar. Däremot kommer bränslet inte att utnyttjas optimalt och bränsleekonomin kommer därigenom att försämrats. Detta gäller speciellt om lastföljningen inte är planerad när härden laddas med nytt bränsle, vilket sker en gång om året.

Även om inget ökat slitage på anläggningen förväntas så ökar risken för driftstörning i samband med effektförändringar. I absolut värsta fall kan ett snabbstopp av anläggningen inträffa.

Inga stora förändringar behöver genomföras om ett kärnkraftverk ska användas som lastföljande. Inte heller några säkerhetsmässiga risker förväntas i samband med långsam och planerad lastföljning. Två regelverk samverkar vid flexibel effektproduktion i kärnkraftverk, dels regelverket för den nukleära anläggningen och dels nätföreskriften. Strålsäkerhetsmyndigheten har inga synpunkter på om anläggningsägaren varierar uteffekten, så länge man håller tryck, temperatur, m.m. inom de gränsvärden som anläggningen är utformad för att klara. Däremot behöver vissa förändringar genomföras på anläggningen om man vill använda den för primärreglering (automatisk frekvensreglering). Automatiska robusta reglersystem måste installeras för att kärnkraftverkets producerade effekt ska kunna styras som funktion av frekvensen på yttre elnät. Strålsäkerhetsmyndigheten kommer vilja att tillståndspröva dessa system innan tillstånd för detta driftsätt medges. Svenska Kraftnät godkänner all slags reglering.

9.1 Fortsatta studier

Vi tror att sekundärreglering som upphandlas i volymer om 10 MW kan bli en intressant produkt för ett kärnkraftverk framöver. Därför är det av intresse att vidare utreda ett kärnkraftverks möjlighet att leverera denna reglerform. I detta projekt har inte lönsamheten i lastföljande kärnkraft utretts. En fortsatt studie av ökade kostnader och intäkter i samband med sekundärreglering är önskvärd. Till exempel skulle ökade bränslekostnader vid olika driftsätt kunna studeras närmare.

10 Referenser

- [1] Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants, 2011.
- [2] Svenska Kraftnät, SvK, www.svk.se.
- [3] Matthias Hundt, Rüdiger Barth, Ninghong Sun, Steffen Wissel, and Alfred Voß, Verträglichkeit von erneuerbaren Energien und Kernenergie im Erzeugungsportfolio, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Germany, October, 2009.
- [4] World Nuclear Association, WNA, www.world-nuclear.org.
- [5] European Utility Requirements, EUR, <http://www.europeanutilityrequirements.org/>
- [6] Bill Prince et al, Operational Aspects of Generation Cycling, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [7] Toshihiko Nakata and Shuichi Ashina, Optimization for the operation of electric power generation taking account of distributed regional demand in Japan, Tohoku University.
- [8] Man Gyun Na, et. al., A Model Predictive Controller for Load-Following Operation of PWR Reactors, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 52, No. 4, August 2005.
- [9] Svenska Kraftnäts föreskrift, SvKFS 2005:2, www.svk.se/Tekniska-krav/Foreskrifter.
- [10] Muntlig kommunikation, Lars Fredlund, specialist Ringhals AB (2011).
- [11] Muntlig kommunikation, Set Persson, Produktionsledningen, Vattenfall AB (2011).
- [12] IAEA, TecDoc 387 (1999).
- [13] Laurent Pouret and William J. Nuttall, Can nuclear power be flexible?, UK, (2007).
- [14] KSU (Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB), Reaktorfysik (2005).
- [15] Forsmark 3, Systembeskrivning för system 535, "System för reaktorns effektregering", KSA 76-551.
- [16] Ringhals 4 systembeskrivning, för system 334: "Kemi- och Volymkontrollsystem Boron Thermal Regeneration System (BTRS)".
- [17] Ringhals 2 – 4, "Effekter av lastföljning PWR", J. Lindhe, 1984.
- [18] The Westinghouse AP1000 Advanced Nuclear Plant, www.ne.doe.gov/pdfFiles/AP1000_Plant_Description.pdf

- [19] US-APWR Design Control Document, Chapter 3.9.1.1.1, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1109/ML110980211.pdf>
- [20] WNN, World Nuclear News, <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=29339&terms=tsuruga>
- [21] U.S. EPR Final Safety Analysis Report, Chapter 3.9.1.1 Design Transients, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1025/ML102571030.pdf>
- [22] ABWR General Description, http://www.foronuclear.org/images/stories/recursos/zona-descarga/Descripcion_general_ABWR_GE.pdf
- [23] GE-Hitachi Nuclear Energy, ESBWR, Design Control Document, Chapter 10.2.1.3.3, <http://adamswebsearch2.nrc.gov/idmws/ViewDocByAccession.asp?AccessionNumber=ML072910054>
- [24] World Nuclear Association, WNA, www.world-nuclear.org/info/inf40.html.
- [25] Forsmark 1 och 2, Effekter av lastföljning, U. Boström, G. Bodlund, 1984.
- [26] Ringhals 2 – 4, Effekter av lastföljning Turbindelen, G. Bodlund, 1984.
- [27] Muntlig kommunikation, Lars Ewald, specialist Ringhals AB (2011).
- [28] Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants, ANSI N18.2, August 1973.
- [29] Muntlig kommunikation, Stefan Arnborg, specialist Svenska Kraftnät (2011).

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se