



CHALMERS

En analys av rotationsenergi från SMR:er

En jämförelse med synkrona kompensatorer och kommersiell kärnkraft

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik

SAMUEL NILSSON

AXEL ZETTERLIND

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023
www.chalmers.se

Förord

Den här studien är ett examensarbete för högskoleingenjörsprogrammet inom maskinteknik på Chalmers Tekniska Högskola som genomfördes under våren 2023. Arbetet har bedrivits av studenterna Axel Zetterlind och Samuel Nilsson på beställning av AFRY. Arbetet skrevs via institutionen av Mekanik och Maritima vetenskaper och examinerades av docenten Mats Andersson. Arbetet omfattar 15 hp.

Först och främst vill vi tacka Daniel Johansson på AFRY som gett oss möjligheten att utföra detta examensarbete. Vi vill även ge ett stort tack till våran handledare Peter Whittaker för all hjälp och vägledning, utan dig hade det aldrig gått.

Samuel Nilsson & Axel Zetterlind

Göteborg, Juni 2023

Sammanfattning

Vårt elnät förses från flera olika kraftgenereringstekniker som kärnkraft, vattenkraft och vindkraft som framställer el som driver hela Norden framåt. Skillnaden mellan vindkraft och de andra teknikerna är att vindkraft inte framställer rotationsenergi som de andra elproducenterna gör. Rotationsenergi eller svängmassa är en biprodukt som skapas av roterande objekt som är synkront kopplat till elnätet som turbiner i kärnkraftverk eller rotorn i en synkron kompensator. Rotationsenergi hjälper till att stabilisera elnätet och gör det mer robust mot frekvensändringar då effektuttaget ändras snabbt.

Idag finns det ett underskott av rotationsenergi i det nordiska elnätet på grund av att flera kärnkraftsreaktorer har avvecklats de senaste åren. I det här examensarbetet studeras elnätet och dess uppbyggnad samt två tekniker som kan bidra med rotationsenergi till elnätet, SMR:er (Små modulära reaktorer) och synkrona kompensatorer, en kort jämförelse mellan kommersiell kärnkraft utförs även. SMR:er är en ny teknik av kärnkraft och för närvarande finns det ingen information om hur mycket rotationsenergi som de kan skapa. En kvalitativ studie har därför bedrivits för att beräkna fram riktvärden för hur mycket rotationsenergi som SMR:er kan tillföra.

Dessa värden har sedan jämförts med synkrona kompensatorer och kommersiell kärnkraft för att kunna bedöma hur tekniken står sig mot redan etablerade tekniker. För att jämföra de olika teknikerna mot varandra jämförs hur många SMR:er och SK som hade behövs för att tillgodose ett behov på 49 GWs. Beräkningarna utfördes med hjälp av E_{\min} och E_{\max} från resultat delen. Studien konstaterar att en SMR-modul genererar mellan 211–1367 MWs beroende på hur mycket effekt den producerar. Studien har konstaterat även att minst 36 stycken SMR-moduler behövs för att möta ett behov på 49 GWs, modulerna hade även producerat 10,8 GW till det nordiska elnätet. Antalet SK med påkopplat svänghjul för att tillföra samma rotationsenergi är minst 108 stycken medan antalet kärnkraftreaktorer är minst 6 stycken.

Nyckelord: Rotationsenergi, Svängmassa, SMR, Synkrona kompensatorer, havsbaserad vindkraft, frekvensstabilitet

Abstract

Our power grid is composed of various technologies such as nuclear power, hydroelectric power, and wind power, which generate electricity that drives the entire Nordic region forward. The difference between wind power and the other technologies is that wind power does not generate system inertia. Rotational energy, or inertia, is a byproduct created by rotating objects that are synchronously connected to the power grid, such as turbines in nuclear power plants or the rotor in a synchronous compensator. Rotational energy helps stabilize the power grid and makes it more resilient to frequency changes when the power consumption changes quickly.

There is a deficit of rotational energy in the Nordic power grid due to the shutdown of nuclear power plants in recent years. This thesis examines the power grid and its infrastructure, as well as three technologies that can contribute rotational energy to the grid: small modular reactors (SMRs), synchronous compensators and regular nuclear powerplants. SMR's are a new nuclear technology, and currently, there is no information available on the amount of rotational energy they can provide. Therefore, a qualitative study has been conducted to estimate the potential amount of rotational energy that SMR's can generate. These values are then compared with synchronous compensators and commercial nuclear power to assess how the technology compares to already established techniques. The study concludes that one SMR module generates inertia in the range of 211–1367 MWs depending on how much energy it produces.

The study also concludes that at least 36 SMR modules are needed to produce the required amount of inertia, 49 GWs. The modules would also produce 10,8 GW to the Nordic power system. The amount of SC with an attached flywheel needed to produce the same amount of inertia would be at least 108 while the number of nuclear reactors would be 6.

Key words: Rotational energy, inertia, SMR, synchronous condenser, ocean based wind power, frequency stability

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Problemformulering	1
1.2 Bakgrund och motiv	2
1.3 Syfte	2
1.4 Avgränsningar	2
2. Teori	4
2.1 Rotationsenergi	4
2.2 DI- (dimensionerande incidenten)	7
2.3 FCR-N	7
2.4 FCR-D-upp	7
2.5 FCR-D-ned	7
2.6 FFR	7
2.7 Kärnkraft	8
2.8 SMR	8
2.9 Turbiner	9
2.10 Kokvattenreaktorer (BWR):	9
2.11 Tryckvattenreaktor (PWR)	9
2.12 Fjärde generationens reaktorer	10
2.13 Vindkraft	10
2.14 Synkronkompensatorer	10
2.14.1 Vindkraftverk och Synkronkompensatorer	11
3. Metod	12
3.1 Litteraturstudier	12
3.2 Marknadsundersökningar	13
3.3 Formler/Beräkningar	13
3.4 Likheter mellan SMR och värmekraftverk	15
4. Resultat	17
4.1 Beräkning av $E_{rot,SMR}$	17
4.2 Synkronkompensatorers energiförbrukning	18
4.3 Hur mycket rotationsenergi kan utvinnas från kärnkraftverk	19
5. Analys	20
5.1 Hur mycket rotationsenergi behövs för att undvika uppköp av FFR	20
5.2 SMR jämfört med SK	21
6. Diskussion	22
6.1 Potentiella användningsområden för teknikerna i elnätet	22

6.2 Energireserver.....	23
6.3 Hållbarhetsbetraktelse.....	23
6.3.1 Fossilfri energiförsörjning.....	23
6.3.2 Förnyelsebar energiförsörjning.....	24
6.4 Förbättringar	24
7.Slutsats.....	25
Referenser.....	26
Bilagor	1
Bilaga 1	1
Bilaga 2.....	2

Nomenklatur

DI: Dimensionerande incidenten

IAEA: International Atomic Energy Agency

FCR-N: Frequency Containment Reserv – Normal

FCR-D: Frequency Containment Reserv – Disturbance

FFR: Fast Frequency Response

Hz: Hertz

GWs: Giga watt sekunder

M: massa

MVA_r: Megawattampere

MW: Megawatt

MWe: Megawatt effekt

R: radie

Rpm: Rounds per minute

SK: Synkronkompensator

SMR: Small Modular Reactor (Små modulära reaktorer)

SvK: Svenska kraftnät

ENTSOE: European Network of Transmission System Operators of Electricity

Svängmassa: Rotationsenergi

RoCoF: Rate of change of frequency

VA_r: Volt Ampere reaktiv

1. Inledning

I takt med att elektrifieringen av samhället ökar sätter det högre krav på att elnätet ska klara av att framställa mer el. År 2045 estimerar SvK (svenska kraftnät) att elförbrukningen kommer ha ökat med 60 % från 126 TWh till ca 200 TWh jämfört med idag [1]. Sverige har även som mål till 2040 att elproduktionen ska vara 100 % procent förnybar, det är däremot inget stoppdatum som förbjuder kärnkraft [2].

En utmaning som uppstår i takt med att omställningen sker är att mängden svängmassa minskar. Svängmassa kan ses som en buffert som tillför tröghet till systemet och gör det mer stabilt. Svängmassa är en biprodukt av elproduktion med synkronmaskiner. Kärnkraft och vattenkraft är de två stora energiformerna i Norden som använder sig av synkronmaskiner. I takt med att den svenska kärnkraften avvecklas har en stor mängd svängmassa försvunnit från systemet. Vindkraft har också en rotationsenergi i form av dess vindturbiner. Däremot är det ingen rotationsenergi som kan brukas av elnätet då vindkraftverken ej är synkront kopplade eftersom deras generatorer inte roterar i fas med elnätets frekvens.

Kärnkraftverk är en stor investering för ett samhälle. År 2023 startade det finska kärnkraftverket Olkiluoto 3 producera el, detta nästan 16 år efter att byggandet av kärnkraftverket startade. Den initiala investeringen beräknades bli 33 miljarder kronor. På grund av förseningar i bygget steg den siffran till ca 87 miljarder kronor [3]. Kärnkraftverk tar generellt ca 7 år att bygga [4] vilket är en lång tid jämfört med att bygga en vindkraftspark som beräknas ta ca 1–3 år [5].

En ny teknik som utvecklas inom kärnkraft är små modulära reaktorer (SMR). En SMR använder samma kärnklyvningsteknik som traditionella kärnkraftverk. Den huvudsakliga skillnaden mellan en SMR och ett traditionellt kärnkraftverk är mängden energi de producerar. En SMR beräknas producera mellan 50–300 MW. Sveriges största kärnkraftsreaktor Oskarshamn 3 producerar 1450 MW. Den stora fördelen med SMR är konstruktionstiden. Då de är moduler kan de serietillverkas. Serietillverkning skulle minska komplexiteten vilket i sin tur minskar konstruktionstiden. Istället för att bygga ett stort kärnkraftverk på plats kan flera SMR sammankopplas för att uppnå samma energimängd på kortare tid. SMRer använder samma synkrona elproduktion som konventionella kärnkraft och kan därför även tillföra med svängmassa till elnätet.

En annan teknik som också kan tillföra svängmassa till elnätet är Synkronkompensatorer vars primära uppgift är att reglera den reaktiva effekten i elnätet har även en roterande massa som tillför svängmassa. Genom att installera ett tungt svänghjul ska svängmassan öka ytterligare. Färöarna som har målet att ha en helt fossilfri elproduktion redan 2030 kommer använda tekniken för att tillföra nödvändig svängmassa till deras elnät [6].

1.1 Problemformulering

I dagsläget minskar mängden svängmassa i det nordiska elnätet. Svängmassa är en biprodukt vid elproduktion med hjälp av synkronmaskiner. Svängmassa gör elnätets frekvens mer stabil och i takt med avvecklingen av kärnkraft, förloras även svängmassan den bidrar med. Med mindre synkront kopplade maskiner minskar andelen svängmassa vilket i framtiden, utan åtgärder skapar ett underskott i elnätet. Mängden rotationsenergi en SMR genererar är i nuläget okänd. Därav är det svårt att uppskatta hur många SMR-moduler som krävs för att förebygga ett underskott. Det går därav inte att jämföra rotationsenergi från SMR:er mot andra synkrona alternativ.

1.2 Bakgrund och motiv

Mängden rotationsenergi i det nordiska elnätet har länge varit god då elproduktionen har bestått av stora mängder kärnkraft och vattenkraft. Minskningen har främst skett i takt med att många kärnreaktorer lagts ner, reaktorer som har genererat stora mängder rotationsenergi. Vindkraftverk har anlagts för att täcka upp elbehovet. Vindkraftverk är generellt ej synkront kopplade till nätet och kan därför inte tillföra rotationsenergi. Underskottet har resulterat i att de energireserver som har använts förut, FCR-N och FCR-D inte alltid klarar av att bibehålla frekvensen 50 Hz. FFR är en ny reserv som upphandlas när frekvensen sjunker för lågt på grund av låga nivåer rotationsenergi i nätet.

I det nordiska elnätet används 50 Hz som nätfrekvens och det är de olika systemoperatörerna i Sverige, Norge, Finland och Själland (Danmark) som ansvarar att frekvensen ligger runt 50 Hz. Anledningen till att frekvensen varierar är att elektricitet är en färskvara. Det produceras lika mycket som det konsumeras och frekvensen är balansen mellan dessa storheter. Skulle det hända att frekvensen faller under 49 Hz, kan det leda till att elektroniska produkter tar skada eller att det blir black-out i systemet.

Eftersom det är efterfrågan som styr produktionen så varierar ofta frekvensen mellan 49,9 – 50,1 Hz. För att frekvensen ska hålla sig inom området används reserverna FCR-N och FCR-D. FCR-N är i ständigt bruk för att reglera små ändringar i nätet. Skulle frekvensen falla under 49,9 eller överstiga 50,1 Hz aktiveras FCR-D, vars uppgift är att upprätthålla frekvensen tills åtgärder kan sättas in. Även här spelar rotationsenergin in, med mer svängmassa i systemet köper man tid för FCRD att aktiveras vid större störningar.

De nedlagda kärnkraftreaktorerna under perioden 2017 – 2020 spelar en stor roll till minskningen av rotationsenergi. Fyra reaktorer stängdes ner och en kombinerad nettoeffekt på 2800 MW försvann samt den tillhörande rotationsenergin på ca 18.35 GWs som fanns i kärnkraftverkens turbiner [7]. En konsekvens av detta är att FCR-reserverna har svårare att upprätthålla frekvensen vid större störningar. Då måste FFR-reserver köpas in för att täcka behovet.

1.3 Syfte

Rapportens syfte är att redogöra hur mycket rotationsenergi SMR:er kan tillföra till elnätet och hur det står sig mot andra tekniker som kärnkraft och synkrona kompensatorer. Rapporten kommer redogöra befintliga metoder som används idag för att bibehålla elnätets frekvens samt potentiella förbättringar som kan användas för att bidra till ett mer stabilt elnät från ett perspektiv där fokuset ligger på svängmassa.

1.4 Avgränsningar

Rapporten kommer inte att göra några specifika beräkningar på turbiner som kan användas till SMR. De beräkningar som presenteras är därmed generella och kan användas till att upplysa om SMR:ers potential att bidra med rotationsenergi.

Rapporten kommer enbart analysera en synkronkompensator då fokuset i rapporten är att presentera rotationsenergi-värden för SMR:er. Kompensatorns roll i rapporten är att jämföra hur konkurrenskraftig SMR:er är inom rotationsenergi.

Några vidareutvecklingskoncept på turbiner kommer inte tas fram, beräkningar och resultat kommer utgå från befintliga modeller. Konkreta beslut kommer ej fattas kring vilken energiform som är bäst lämpad för problemet, istället kommer fakta presenteras till AFRY som bestämmer lämpligast lösning internt.

Vid jämförelsen mellan SMRer och synkronkompensatorer kommer enbart tillförd mängd effekt samt rotationsenergi behandlas. Andra aspekter som till exempel kostnad kommer ej behandlas.

2. Teori

För att förstå rotationsenergens centrala roll i det nordiska elsystemet behövs en djupare förståelse av vilka processer som existerar för att stabilisera frekvensen idag samt vilka möjligheter och tekniker som finns för att göra elnätet mer stabilt i framtiden.

2.1 Rotationsenergi

Rotationsenergi i ett system definieras som förmågan ett system har att hantera ändringar i systemets frekvens med hjälp av den kinetiska energi som system har lagrat i roterande massor. I det nordiska elnätet lagras en majoritet av rotationsenergin i form av synkronmotorer.

Det nordiska elnätets rotationsenergi varierar mycket beroende på vilken årstid det är. På vinterhalvåret 2022 låg rotationsenergi i genomsnitt kring 211 GWs. Jämför man det med sommarmånaderna så hade de en genomsnittlig rotationsenergi runt 177 GWs [8]. Anledningen till att det skiljer så mycket är dels för att sommarmånaderna används för att inspektera och utföra underhållsarbeten på kärnkraftverken vilket gör att deras rotationsenergi försvinner. Den andra anledningen är att den allmänna konsumtionen av el är betydligt lägre på sommaren då medeltemperaturen är högre. Det resulterar i att hushåll, industrier, byggnader inte behöver använda el för uppvärmning.

Den genomsnittliga rotationsenergin i det nordiska elnätet har en nedåtgående trend. Den största bidragande faktor till trenden är avvecklingen av reaktorerna Oskarshamn 1 & 2 år 2017 samt Ringhals 1 & 2 år 2019 respektive 2020. Reaktorerna tillförde en betydande mängd rotationsenergi till systemet [7]. Det modellerande kravet som är presenterat av svenskt näringsliv är 159 GWs. Det modellerande kravet är den mängd rotationsenergi som konstant behöver vara tillgänglig i systemet för att undgå att köpa in FFR-reserver.

Tabell 1. Modellerande krav på rotationsenergi i det nordiska synkrona kraftsystemet [9]

Mätvärde	Rotationsenergikrav utan FFR
ROCOF	72 GWs
Frekvensnadir	159 GWs
Maxfrekvens	154 GWs

Rotationsenergin i systemet har flera gånger sjunkit under 125 GWs. I takt med att kärnkraftreaktorer har avvecklats och rotationsenergi försvunnit så har även antal tillfällen där rotationsenergin är lägre än 125 GWs ökat [9]. Synkronmaskiner och generatorer håller en mängd lagrad rotationsenergi i sig vid ett givet tillfälle. Hur mycket beror på hur stor massa den har och hur snabbt den roterar. Enligt formeln. [10]

$$E_{rot} = \frac{I\omega^2}{2}$$

Ekv 1.

Där

$$I = \int_{r_1}^{r_2} mr \, dr$$

Ekv 2.

$I =$ Tröghetsmomentet [$kg \cdot m^2$]

$\omega =$ Rotationshastighet [rad/s]

Tröghetsmomentet I är ett mått som beskriver hur stort vridmoment som krävs för ett givet objekt att rotera runt dess axel. Tröghetsmomentet är beroende av objektets form, därför beräknas I med hjälp av en integral där r_1 är radien för första turbinbladssteget medan r_2 är radien för sista turbinbladssteget. I det här projektet kommer turbinerna antas som solida istället för att ta bort det tomrum som existerar mellan turbinbladen. Detta görs på grund av att det inte finns någon information att tillgå hur mycket av turbinens totala volym som består av luft. Antagandet gör att resultatet av tröghetsmomentet kommer bli större än vad det egentligen är vilket kommer leda till att H -värdet kommer bli större än vad som kommer utvinnas i praktiken. Dessa antaganden görs för att underlätta eventuella beräkningar med formeln.

Divideras rotationsenergin med den skenbara effekten som produceras fås tröghetskonstanten H som är ett mått på hur många sekunder en energikälla kan fortsätta producera den reaktiva effekten efter produktionen har stannat.

Tröghetskonstanten H definieras med formeln nedan

$$H = \frac{E_{kin}}{S_{Nom}} = \frac{I\omega^2}{2S_{Nom}} = \frac{I(2\pi f)^2}{2S_{Nom}}$$

Ekv 3.

Där

$H =$ Tröghetskonstanten [s]

$S_{Nom} =$ Skenbar effekt [VA]

$$S_{Nom} = \frac{P}{\cos(\varphi)}$$

Ekv 4.

Olika typer av energikällor har olika tröghetskonstanter. Bäst frekvensstabilitet ger den energikällan med högst H -värde. Exempel på olika energikällor och H -värden ges i tabell 2.

Tabell 2. Exempel på tröghetskonstanten för olika energikällor

Energityp	Tröghetskonstant [s]
Kärnkraft	5,9
Vattenkraft	3,7
Fossil förbränning (kol)	3,8-4,2
Fossil förbränning (gas)	4,2
Vindkraft	0
Solceller	0

Kärnkraft har högst tröghetskonstant med en tröghetskonstant på ca 5,9 sekunder. Vattenkraft och förbränning av fossila bränslen (kol och gas) har en tröghetskonstant på ca 4,2 sekunder. Vindkraft och solceller har generellt ingen tröghetskonstant då deras elproduktion vanligtvis inte är synkront kopplat till elnätet.

Konstanten säger i sig inte så mycket men man kan uttrycka den lagrade energin i megawatt sekunder (MWs), ekvationen blir då istället. [11]

$$E_{k,sys} = S_{n,sys} H_{sys} = \sum_{i=1}^N S_{ni} H_i \text{ [MWs]}$$

Ekv 5.

Elkonsumtionen i elnätet är aldrig konstant. Det innebär att elproducenterna hela tiden måste reglera hur mycket el som ska produceras. De små förändringarna som sker hela tiden påverkar frekvensen ytterst lite. Obalans i systemet sker först vid stora störningar och kan få elnätets frekvens att minska till för låga nivåer. Ett exempel på en stor störning är när en reaktor plötsligt stänger av. När det sker förlorar elnätet både den aktiva effekten och rotationsenergin från reaktorn. Resultatet av detta är att de andra synkront kopplade enheter måste kompensera för förlusterna och producera mer energi genom att utvinna den rotationsenergi som finns lagrad i de roterande massorna. När det sker sjunker frekvensen i elnätet och då kan problem uppstå.

Eftersom elektricitet är en färskvara måste det produceras lika mycket el som det konsumeras. Om det efterfrågas mindre el än vad det produceras kommer frekvensen överstiga 50 Hz. Om det däremot produceras mindre el än vad som efterfrågas kommer frekvensen att sjunka. Kan inte elproducenterna då tillgodose behovet måste åtgärder sättas in för att undvika störningar. En konsekvens av låg frekvens är att konsumenter måste kopplas bort från elnätet för att försöka balansera upp frekvensen. Skulle frekvensen sjunka lägre än 49 Hz kan det ske en total nedstängning av elnätet [12]. Konsekvenserna av en total nedstängning av elnätet hade varit katastrofal och skapat enorma socioekonomiska effekter.

2.2 DI- (dimensionerande incidenten)

För att motverka att frekvensen ska falla under 49 Hz, har olika energireserver tagits fram som beredskap vid ett bortfall av produktion. I det nordiska elnätet finns det i nuläget tre primära reserver. FCR-N, FCR-D och FFR. Deras funktion förklaras mer genomgående i kapitel 2.3, 2.4, 2.5 och 2.6. De är dimensionerande efter det potentiellt enskilt största bortfallet av energitillförsel i det nordiska elnätet, även kallad den dimensionerande incidenten.

Den dimensionerande incidenten i det nordiska elnätet är i nuläget reaktor 3 i Oskarshamn [9]. Oskarshamn-3 producerar 1450 MW. Det största plötsliga bortfallet som kan inträffa i det nordiska elnätet är därav 1450 MW. Det är därför viktigt att det resterande systemet klarar av detta plötsliga bortfall utan att frekvensen påverkas till den mån att det uppstår komplikationer.

2.3 FCR-N

FCR-N (Frequency containment reserve for normal operation) är en energireserv som används konstant i det svenska elnätet för att bibehålla 50 Hz i systemet. Energipoolen består främst av vattenkraft. FCR-N är aktiverat när frekvensen i systemet ligger mellan 49,9-50,1 Hz [13].

För att som elproducent kvalificera sig som FCR-N så måste man ha en minimieffekt på 0,1 MW. Aktivering av 63 % av systemet ska vara igång inom 60 sekunder och vara i fullt bruk inom tre minuter. Reserven ska även ha en uthållighet på över en timme. Kraven är uppsatta av SvK.

Det totala volymkravet som Sverige och även hela Norden kräver är 231 MW vid ett givet tillfälle. Volymkravet är baserat på DI.

2.4 FCR-D-upp

FCR-D (Frequency containment reserve for disturbance) är en energireserv som endast används vid större störningar i elnätet, (<49,9 Hz). Energipoolen består främst av vattenkraft. Systemkraven för FCR-D är att de ska vara uppe i 50% beredskap inom 5 sekunder och vara i full drift (100 %) vid 30 sekunder, reserven skall även ha en uthållighet på 20 minuter. Det totala volymkravet i Sverige och även hela nordiska elsystemet är 558 MW som är dimensionerat efter DI [14].

2.5 FCR-D-ned

FCR-D (Frequency containment reserve for disturbance) är en energireserv som endast används vid större störningar i elnätet, (>50,1 Hz). Energipoolen består främst av vattenkraftverk som minskar produktionen genom att reducera dess flöde. Systemkraven för FCR-D är att de ska vara uppe i 50% beredskap inom 5 sekunder och vara i full drift (100 %) vid 30 sekunder, reserven skall även ha en uthållighet på 20 minuter. Det totala volymkravet i Sverige och även hela nordiska elsystemet är 538 MW som är dimensionerat efter DI [15].

2.6 FFR

FFR (Fast Frequency Reserve) används som stöd till elnätet i form av frekvensstabilitet. Definitionen för FFR är att ett kontrollerat elektriskt moment tillsätts i system för att motverka obalans i systemets frekvens. [16] Mängden elektriskt moment som tillförs styrs av RoCoF som på engelska är förkortat från "rate of change of frequency", RoCoF beskriver förändring av frekvens vid ett givet tillfälle i tiden.

Det som skiljer FFR mot FCR-reserverna är att FFR inte är direkt kopplad till det synkrona nätverket utan kopplas på elektroniskt, ENTSOE (European Network of Transmission System Operators of Electricity) har presenterat tre olika alternativ för elproducenter att välja mellan [17]:

- Alternativ A aktiveras när nätets frekvens sjunker under 49.7 Hz, den maximala tiden det tar för reserven att uppnå maximal kapacitet är 1,3 sekunder.
- Alternativ B aktiveras när nätets frekvens sjunker under 49.6 Hz., den maximala tiden det tar för reserven att uppnå maximal kapacitet är 1,0 sekund.
- Alternativ C aktiveras när nätets frekvens sjunker under 49.5 Hz., den maximala tiden det tar för reserven att uppnå maximal kapacitet är 0,7 sekunder.

För att vara kvalificerad att bli FFR-producent krävs det att ett minimum på 0,01 MW produceras samt att den dimensionerande incidenten i ditt system ej får överstiga 50 MW. FFR-reserver köps upp i Norden när den totala rotationsenergin i systemet understiger 155 GWs [9].

2.7 Kärnkraft

I Sverige finns 6 aktiva kärnkraftreaktorer i drift som enligt IAEA producerar mellan 1040 – 1450 MW [18]. 1972 byggdes Oskarshamn 1 som var den första kommersiella kärnkraftreaktorn i Sverige [19]. De utgör 31 % av den totala energitillverkningen [20]. Kärnkraftverk beräknas ha en livstid på ca 50 år. Sverige byggde de aktiva kärnkraftverken under 70- och 80-talet vilket resulterar i att det börjar bli dags att antingen renovera, bygga nya kärnkraftverk eller hitta nya tekniker för att ersätta de gamla reaktorerna.

2.8 SMR

Små modulära reaktorer är mindre kärnkraftverk som levereras likt prefabricerade hus. Modulerna tillverkas i en fabrik som sedan installeras på utgiven plats. Fördelarna med konceptet är att det är möjligt att producera flera kärnkraftverk i en snabbare takt än vad det skulle ta att bygga dem på plats. En skillnad mellan ett kärnkraftverk och en SMR är att en SMR-modul maximalt producerar 300 MW) [21] medan ett kärnkraftverk generellt producerar mer än 1000 MW. Eftersom de är modulära är det möjligt att koppla ihop flera stycken vilket möjliggör att parallellkopplade SMR:er kan producera lika mycket eller mer än dagens kärnkraftverk.

SMR:er är fortfarande i utvecklingsstadiet men idag finns det ett redan ett fåtal i bruk t.ex. Akademik Lomonosov i Ryssland [22], de är däremot inte gjorda för att serietillverkas. De första reaktorerna som ska användas för kommersiellt bruk beräknas vara redo för produktion runt 2030. De företag som kommit långt i utvecklingen är bland annat Amerikanska NuScales Power Module, AmerikanskJapanska GE-Hitatchis BWRX-300 och Brittiska Rolls-Royce UK SMR. Dessa SMR:er är goda utgångspunkter att som referensram eftersom de använder vatten som kylmedel vilket gör att de kan direkt jämföras med de nordiska kärnkraftverken som använder sig av samma teknik. Egentligen är UK SMR för stor för att titulera sig som en SMR, men tack vare att konceptet har kommit så långt i utvecklingen så anses den ändå vara en SMR. Mer information om skillnaderna mellan SMR:erna presenteras i tabell 3.

Tabell 3. SMR koncept

SMR-koncept	UK-SMR	NuScale	BWRX-3000
Ursprungsland	Storbritannien	USA	USA/Japan
Elektrisk effekt (MW)	443	60	270-290
Designstatus	Konceptuell	Design certifiering	Förlicensering

I Sverige har regeringen lagt fram ett förslag om att öka antalet platser där kärnkraftreaktorer kan byggas. Idag är det endast tillåtet att konstruera kärnkraft på de platser där det redan finns kärnkraft samt att maximala antalet reaktorer i landet är 10 stycken [23]. Med den här politiska riktningen, öppnar det upp för SMR:er i Sverige då det finns för nuvarande 6 reaktorer i drift [7].

En annan användning för SMR:er är att man kan producera elektricitet och värme lokalt, likt Akademik Lomonosov i Ryssland. Det går därav att placera en SMR vid en energikrävande industri eller vid ett samhälle för att upprätthålla energibehovet.

2.9 Turbiner

Gemensamt för alla turbiner är att de omvandlar mekanisk energi till elektrisk. Ångturbiner drivs av ånga och används främst in kärnkraft. De fungerar så att reaktorn genererar värme som i sin tur värmer upp vatten som förångas. Ångan kanaliseras till turbinerna där den mekaniska energin som skapas omvandlas till elektricitet med hjälp av en generator. Till skillnad från kärnkraft så drivs vattenkraft av turbiner som utnyttjar vattnets potentiella och kinetiska energi. Genom att reglera inflödet av vatten kan man mycket enkelt bestämma hur mycket energi som ska produceras. Vid energiproduktion inom kärnkraft och vattenkraft är det turbinerna som genererar rotationsenergi. Hur mycket beror på turbinens tröghetsmoment samt hur mycket elektricitet som genereras.

2.10 Kokvattenreaktorer (BWR):

Kokvattenreaktorer eller "Boiling Water Reactor" som det heter på engelska genererar ånga direkt från reaktorn och leder det till turbinen direkt. Systemet är mycket enklare än tryckvattenreaktorer som består av flera komponenter i systemet. BWR är designade för lägre tryckförhållanden eftersom ångtrycket som framställs i reaktorn är ungefär den samma som ska användas i turbinen. En stor nackdel med BWR:er är att ångan som driver turbinen är radioaktiv eftersom det kommer ifrån reaktorn. Det här bidrar till att de delar som transporterar ångan samt turbinen utsätts för radioaktivitet vilket medför att konstruktionen av dessa delar måste ta det i beaktning.

2.11 Tryckvattenreaktor (PWR)

Tryckvattenreaktor eller "Pressurized Water Reactor" består av två kylningssystem. Det första systemet är kopplat med reaktorn och använder trycksatt vatten som kylmedel i reaktorhärden. Det andra kylsystemet är kopplat till ångturbinen. Det första systemet värmer upp i reaktorn och överför värmen från första systemet till det andra i ånggeneratorerna som fungerar som likt en värmeväxlare. Vattnet i det andra systemet förångas som driver turbinen. Systemet är mer komplext än BWR, däremot är det endast det första systemet som blir radioaktivt vilket medför att det andra systemet inte behöver anpassas för att tåla radioaktivstrålning.

2.12 Fjärde generationens reaktorer

Lättvattenreaktorer är den reaktortyp som används mest frekvent idag. Det heter så eftersom dess kylmedel är vanligt vatten. Det finns däremot andra sätt att kyla reaktorhärden än med vatten. I fjärde generationens reaktorer använder man salt, gas eller smältmetall som kylmedel [24]. En fördel med fjärde generationens reaktorer är att de kan generera högre temperatur och tryck än de i tredje generationen. Det leder till att man kan använda större turbiner vilket genererar mer energi. Dessa reaktorer går även att tillämpa för SMR:er. De kommer däremot generera mer än 300 MWe och kommer därför inte de behandlas med större beaktning i det här projektet. En annan fördel med fjärde generationens reaktorer är att de använder bränslet betydligt effektivare än de reaktorer som finns idag, vilket bidrar till att avfallet inte är lika långlivat. De är också konstruerade så de inte kan orsaka allvarliga olyckor [25].

2.13 Vindkraft

Vindkraften är den teknik i nordiska elnätet som expanderas i störst takt och får allt större inflytande på elnätet. Den väderbaserade tekniken skiljer sig från de andra stora elproducenterna som kärn- och vattenkraft genom att de inte genererar någon rotationsenergi då vindkraft generellt inte är synkront kopplat till elnätet. Det betyder dock inte att vindkraftverk inte kan bidra med att stabilisera elnätet. Genom avancerade styr- och reglersystem är det möjligt att framställa syntetisk svängmassa. Systemen analyserar kontinuerligt frekvensen i elnätet och anpassar därefter elproduktionen för att kunna balansera effekten. Däremot ska det tilläggas att vindkraftverk är väderberoende och kan därför enbart generera el samt syntetisk svängmassa när vinden driver vindkraftverket.

Idag producerar ett markbaserat vindkraftverk mellan 2 – 8 MW enligt Vestas och Siemens Gamesa produktportfolio. Dessa två företag är världsledande inom vindkraft och har ett stort utbud på olika varianter av vindkraftverk. Däremot finns det mer effekt att hämta från vindkraftverken som är havsbaserade. Enligt de tidigare nämnda företagen kan ett havsbaserat vindkraftverk producera 8 – 15 MW. Sedan beror det på vindförhållanden hur mycket energi vindturbinen kan generera.

2.14 Synkronkompensatorer

Synkronkompensatorer reglerar den reaktiva effekten som stabiliserar elnätets frekvens. Reaktiv effekt beskrivs med enheten VAR. En synkronkompensator är inte avsedd för att generera någon aktiv effekt som kan användas till elkonsument utan enbart reaktiv effekt som bidrar med att hålla elnätets frekvens i balans [26].

Majoriteten av de moderna synkronkompensatorerna producerar mellan 20 – 200 MVAR, dock går det även att tillverka större SK som kan generera upp till 350 MVAR [26]. Likt SMR:er är det möjligt att koppla ihop flera stycken med varandra för att öka den reaktiva effektproduktionen. Mängden producerad reaktiv effekt påverkar ej hur mycket rotationsenergi som kompensatorn bidrar med. Det beror på att den roterande massan i en kompensator är lika stor.

För att starta igång SK krävs en startmotor, till exempel en ponny-motor, som driver rotorn till det att den uppnår samma frekvens som elnätet. När detta har uppnåtts så kopplas ponny-motorn bort och SK fortsätter att rotera synkront med hjälp av tillförd reaktiveffekt från elnätet [27]. Vid ett bortfall av rotationsenergi kan den roterande massan i synkronkompensatorn användas upp för att stabilisera elnätets frekvens.

Synkrona kompensatorer går att koppla ihop med ett fysiskt svänghjul för att generera ytterligare rotationsenergi till elnätet. Med ett svänghjul kräver kompensatorn mer effekt från ponnymotorn för att komma igång. Den totala rotationsenergin den sedan kan generera till elnätet ökar däremot betydligt. Anläggningen funkar därmed som en reserv av rotationsenergi till elnätet som kan kopplas

på vid behov. Ett exempel på användande av svänghjul planeras att införas i England. Där planerar ABB att bygga en synkronkompensatoranläggning som kommer producera 67 MVar till elnätet. Med ett påkopplat svänghjul på 40 ton ökade den tillgängliga rotationsenergin med 3.5 gånger mer än om inget svänghjul hade installerats. Projektet blev klart i Mars 2023 [6].

En synkronkompensatorsmodell AMS-1400 som tillverkas av ABB kan enligt företaget tillföra 100 MWs till elnätet. Kopplar man sedan på ett svänghjul kan den tillförda mängden rotationsenergi uppgå till 470 MWs [27]. Energianvändningen för en sådan modul är låg relativt till hur mycket reaktiv effekt den behandlar. Enligt ABB beror energiförbrukningen på hur mycket VAr som behandlas av synkronkompensatorn vid en given tidpunkt. Vid låga nivåer VAr är energiförbrukningen 0,7 % och vid höga nivåer 1,1 % [27].

2.14.1 Vindkraftverk och Synkronkompensatorer

Då synkronkompensatoranläggningar enbart förbrukar el minskar därmed även den totala energimängd som finns tillgänglig för konsumenten. För att kompensera för en sådan minskning kan man använda sig av vindkraftverk. Anledningen till att just vindkraftverk är en intressant producent i detta fall är att vindkraft vanligtvis inte tillför någon rotationsenergi till elnätet. I teorin kan då vindkraftverk indirekt tillföra rotationsenergi till systemet då de driver en synkronkompensatoranläggning som i sin tur tillför rotationsenergi.

3. Metod

Det här kapitlet redogör de metoder som har använts till att lösa de problem som presenterats. Projektet har använt de metoder och formler som ligger som underrubriker i det här kapitlet. Varje underrubrik förklarar mer detaljerat vad varje metod innebär och hur det bidrar till att lösa problemet.

3.1 Litteraturstudier

Den primära undersökningsmetoden till att undersöka problemet har varit att tolka de teorier och fakta som finns idag om elnätets stabilitet, SMR, synkrona kompensatorer och vindkraft. De litterära verken har främst bestått av teoriböcker och vetenskapliga rapporter inom ämnet. Fokuset har främst varit att få en bra bakgrundsbeskrivning om hur det nordiska elnätet fungerar när det kommer till att bibehålla nätfrekvensen på 50 Hz och vilka tekniker som används till det. Ett annat fokus har varit att hitta information om SMR:er eftersom det är en ny teknik som eventuellt kan implementeras i elnätet och konkurrera mot konventionell kärnkraft men även förnyelsebara producenter som vindkraft.

Bakgrundstudien gav mycket information då det redan finns många studier och fakta om hur det nordiska elnätet är uppbyggt som även beskriver problemet kring bristen av rotationsenergi i systemet. Gemensamt hos verken var att de var enade om att en låg rotationsenergi-nivå i elnätet är oroväckande eftersom det kan påverka elnätets stabilitet.

Informationen som fanns att tillgå vid sökning om små modulerade reaktorer var begränsad. Det beror främst på att de fortfarande är i utvecklingsstadiet. Det finns många projekt och aktörer som driver utvecklingen framåt. Den information som finns är ofta generell och förklarar mer allmänt om tekniken och nämner få detaljer. Informationen har använts för att få en god förståelse om hur SMR:er kommer att fungera. För att hitta trovärdig och relevant litteratur har sökmotorerna Google scholar och Chalmers bibliotek använts. Dessa sökmotorer innehåller vetenskapliga artiklar, journaler och böcker som innehåller mycket teori och fakta. Sökningen av information har bestått av fyra huvudkategorier. Elnätet, rotationsenergi, SMR, vindkraft och ångturbiner. Några exempel på sökord kan avläsas i tabell. Många sökord samt källor har varit på engelska för att öka sökområdet.

Tabell 4. sökord för litteraturstudier

Elnätet	Rotationsenergi	SMR	Vindkraft	Ångturbiner
Nordiska elnätet	FFR	BWRX-300	Vindkraftverk	Turbomaskiner
Svenska kraftnätet	Syntethic inertia	Rotational energy from SMR	Syntetisk svängmassa	Steam turbine
Rotationsenergi i det nordiska elnätet	Inertia in steam turbines		Synkronkompensator	Siemens Energy
Future system inertia 2	FCR-reserver		ABB	ABB
	Dimensionerande Incidenten			

3.2 Marknadsundersökningar

Genom att analysera olika vindkraftverk hos olika producenter är det möjligt att få fram generell information om tekniken som kan vara bidragande för rapporten. Vid sökning av vindkraftverk var de primära målen att få fram information om:

- Hur mycket effekt som kan utvinnas
- Skillnader på land- och havsbaserad vindkraft

Marknadsanalyser utfördes på väletablerade företag inom branschen till exempel Vestas och Siemens Gamesa. Analyserna används sedan som underlag för värden vid jämförelser och beräkningar. Det ska tilläggas att det finns vindturbiner som kan generera mer eller mindre effekt än de som företagen ovan producerar. Dock ger det en bra överblick om var intervallet ligger.

En marknadsundersökning utfördes även på SK. Eftersom ABB erbjöd mycket mer information om deras SK än deras konkurrenter som t.ex. Siemens Energy, valdes ABB:s modell AMS-1400 som referens i rapporten för att kunna leverera mer precis information.

3.3 Formler/Beräkningar

I det här kapitlet presenteras de formler och uttryck som används i metod och resultat. Formulerna är en vital del för att få ett värde till de problemformuleringarna som det här projektet ska undersöka.

Tröghetskonstant

$$H = \frac{E_{kin}}{S_{Nom}} = \frac{I\omega^2}{2S_{Nom}} = \frac{I(2\pi f)^2}{2S_{Nom}}$$

Ekv 3.

Där $f = 50$ Hz eftersom det är den frekvensen som används i elnätet

Skenbar effekt

$$S_{Nom} = \frac{P}{\cos(\varphi)}$$

Ekv 4.

Där $P =$ reaktiv effekt, $\cos(\varphi) = 0.9$ [1]

Tröghetsmoment

$$I = \int_{r_1}^{r_2} mr \, dr$$

Ekv 2.

Beräkning av den genomsnittliga rotationsenergin i det nordiska elnätet 2022 enligt fingrids siffror

Tabell 5. Rotationsenergi Norden 2022

Källa: Fingrid [2]

	Medelvärde (GWs)	Min (GWs)	Max (GWs)
Jan	214	173	249
Feb	211	168	252
Mar	221	54	258
Apr	204	159	247
Maj	167	139	195
Juni	177	149	201
Juli	175	144	201
Augusti	181	150	219
September	177	147	206
Oktober	178	150	215
November	206	151	241
December	206	136	250

Tabell: 6. Medelvärde rotationsenergi i Norden år 2022.

Medelvärde-12 mån	193,08 GWs
Medelvärde-Sommar (Juni-Augusti)	177,67 GWs
Medelvärde-Vinter (November-Mars)	211,60 GWs

3.4 Likheter mellan SMR och värmekraftverk

SMR:er och värmekraftverk har mycket gemensamt, det finns stora likheter när man ser på turbinerna och hur elen framställs. Båda teknikerna använder sig av ångturbiner och producerar el i samma effektintervall. Det som skiljer dem är hur värmen framställs vilket inte bör påverka turbinen. Ur rent teoretiskt perspektiv är det därav möjligt att byta ut förbränningsdelen från ett kolkraftverk mot en kärnreaktor och återanvända samma turbin och generator för att framställa elektricitet förutsatt att kärnreaktorn kan producera lika mycket energi som kolkraftverket gjorde innan.

Med det här antagandet kan man anta att SMR:er kommer producera lika mycket rotationsenergi som kolkraftverk som producerar inom intervallet 50 – 300 MWe då samma roterande massa används. Tröghetskonstanten H för kolkraftverk ligger ungefär mellan 3.8 - 4.2 s. Dock ska det förtydligas att det finns kolkraftverk som producerar betydligt mer än 300 MW vilket gör att SMR:er troligtvis kommer ha ett H värde som är lägre än 4.2 s eftersom dessa kolkraftverk är med i beräkningarna till H -konstanten.

14 februari 2022 kom nyheten att KGHM signerat ett avtal med Nuscale att utforska möjligheten att återvända existerande kolkraftverk i Polen till SMR-produktion. Projektet har som mål att tillsätta en reaktor redan 2029 [29]. Målet med projektet är att byta ut kolkraften som har höga koldioxidutsläpp till kärnreaktorer som relativt till kolkraften har låga utsläpp.

Enligt Staffan Qvist, teknologie doktor vid Berkeley, är det möjligt att modifiera existerande turbiner och generatorer vid kolkraftverken till SMR-produktion. I rapporten skriver han också att fler studier behöver göras på om en sådan omställning är ekonomiskt konkurrenskraftig mot alternativet att köpa en helt ny turbin och generator [30].

Qvist har forskat vidare på möjligheten att ta bort värmekällan hos ett kolkraftverk och byta ut det mot en PWR SMR [31]. De använder sig av en 460 MWe turbin som drivs av superkritisk ånga med trycket 28 MPa och temperaturen 560 - 580 grader. Den stora utmaningen med att byta ut värmekällan är att temperaturen och trycket från ett kolkraftverk är mycket större än vad en SMR kan producera. I försöket som Qvist varit med och genomfört fick de mättad ånga på 7 MPa och en temperatur på 285 grader, vilket är 25% av trycket och cirka hälften av temperaturen som turbinen i experimentet är konstruerad för. Genom att koppla bort högtrycksturbinen och leda ångan direkt till första lågtrycksturbinen som får agera högtrycksturbin är det möjligt att driva turbinen trots skillnaderna mellan tryck och temperatur. Resultaten från undersökningen visar att det är möjligt att utvinna 223 – 267 MWe beroende på vilka fler modifikationer som är gjorda på turbinerna. Det här betyder även att det är möjligt att utvinna tillräckligt med elektricitet som en SMR är tänkt att generera.

Det här bekräftar hypotesen att det är möjligt att anta att SMR:er kan producera nästan lika mycket rotationsenergi som kolkraftverk med några få undantag:

- Eftersom kolkraftverk kan producera mer än 300 MW kommer inte SMR:er nå till den övre gränsen som är angivet i tabell 3
- I experimentet har HP-turbinen kopplats bort vilket medför bortfall med roterande massa. Däremot är HP-turbinen mycket mindre i både massa och radie än vad LP-turbinerna är vilket inte gör att det totala bortfallet inte påverkar antagandet i en större grad.

Resultatet av det här antagandet är att SMR:er har ett H -värde som är definierat:

$$3,8 \leq H_{SMR} < 4,2$$

Värt att notera med en här teorin är att fjärde generationens reaktorer opererar inom samma temperatur- och tryck intervaller som kolkraftverk [31]. Det betyder att det är fullt möjligt att byta ut värmekällan mot en SMR av fjärde generationen.

Turbinen V94.2/SGT5-2000E är en gasturbin som används till kolkraftverk vid produktion av el. Turbinen producerar 200 MW och har ett H-värde på ungefär 5,23 s. Ett rimligt antagande är då att vid en ombyggnation av ett kolkraftverk med en V94.2/SGT5-2000E turbin, om inga modifikationer krävs på den roterande massan i turbinen kan en SMR erhålla ett H-värde på 5,23 s. Detta skulle i sin tur ge elnätet 1,046 GWs rotationsenergi. Jämför man det med hur mycket rotationsenergi som skulle krävas för att motverka en minskning i frekvensen från 50 till 49 Hz i ett system med 160 GWs rotationsenergi skulle det tillföra drygt en sjättedel av behovet (6,34 GWs) [9].

4. Resultat

I det här kapitlet redovisas det som tagits fram i metodkapitlet med avseende på den teori som har presenteras tidigare.

4.1 Beräkning av $E_{rot,SMR}$

Med hjälp av resultatet samt med informationen att SMR:er beräknas producera 50 – 300 MWe är det nu möjligt att ge ett intervall på hur mycket rotationsenergi SMR:er förväntas producera.

Med ekv.(1) och ekv.(2) och värdena för $P_i= 50, 100, 150, 200, 250$ och 300 MW och variera H med $H_{min}=3,8$ s och $H_{max}=4,1$ s är det nu möjligt att få fram ett intervall för hur mycket rotationsenergi varje turbinstorlek kan generera. Resultaten kan redovisas nedan:

$$E_{rot,SMR,50_{min}} = H_{min} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 3,8 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{0,9} \approx 211 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,50_{max}} = H_{max} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 4,1 \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{0,9} \approx 228 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,100_{min}} = H_{min} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 3,8 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{0,9} \approx 422 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,100_{max}} = H_{max} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 4,1 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{0,9} \approx 456 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,150_{min}} = H_{min} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 3,8 \cdot \frac{150 \cdot 10^6}{0,9} \approx 633 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,150_{max}} = H_{max} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 4,1 \cdot \frac{150 \cdot 10^6}{0,9} \approx 683 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,200_{min}} = H_{min} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 3,8 \cdot \frac{200 \cdot 10^6}{0,9} \approx 844 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,200_{max}} = H_{max} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 4,1 \cdot \frac{200 \cdot 10^6}{0,9} \approx 911 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,250_{min}} = H_{min} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 3,8 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{0,9} \approx 1055 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,250_{max}} = H_{max} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 4,1 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{0,9} \approx 1139 \text{ MWs}$$

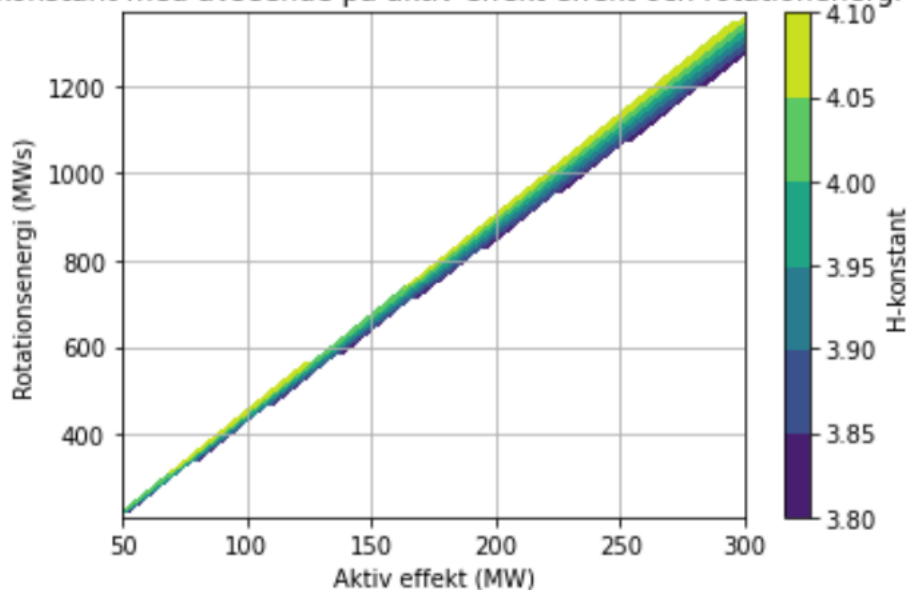
$$E_{rot,SMR,300_{min}} = H_{min} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 3,8 \cdot \frac{300 \cdot 10^6}{0,9} \approx 1267 \text{ MWs}$$

$$E_{rot,SMR,300_{max}} = H_{max} \cdot \frac{P}{\cos \varphi} = 4,1 \cdot \frac{300 \cdot 10^6}{0,9} \approx 1367 \text{ MWs}$$

Värdet $H_{max} = 4,1 \text{ s}$ antas på grund av att $H_{SMR} < 4,2$ och med en säkerhet på 25% upp mot det antagandet anses värdet på 4.1 vara rimligt att anta. Därför ligger SMR:ers rotationsenergi i intervallet $211 \leq SMR \leq 1367 \text{ MWs}$.

Eftersom H-konstanten beror på förhållandet mellan tröghetsmomentet och den skenbara effekten (se ekv. (1)). Tröghetsmomentet beror på de fria variablerna massa och radie. Det resulterar i att H-konstanten kan variera för turbiner med samma effektutvinning vilket kan urskiljas i figur 1. Det betyder även att en turbin som utvinner 300 MW kan bidra med olika mycket rotationsenergi beroende på de fria variablerna. Det resulterar även att en SMR-modul kan tillföra mellan 0,13–0,86 % till det totala modellerande kravet i det nordiska systemet.

H-konstant med avseende på aktiv effekt effekt och rotationenergi



Figur 1. H-konstant med avseende på aktiv effekt och rotationsenergi

4.2 Synkronkompensatorers energiförbrukning

En synkronkompensator med ett påkopplat svänghjul tillför stabilitet till elnätet på två olika sätt. Den producerar reaktiv effekt och bidrar med rotationsenergi till nätet genom svänghjulet och den roterande massan i synkronkompensatorn. ABB's modell AMS1400 tillför 60MVAR till nätet [6]. Det påkopplade svänghjulet och den roterande massan i synkronkompensatorn bidrar tillsammans med en tillförd rotationsenergi på ca 470 MWs.

Energien som krävs för att driva en synkronkompensator av storleken 60 MVAR är väldigt låg relativt till hur mycket reaktiv effekt den kan producera, detta tack vara att synkronkompensatorer har en

energiförlust på ca 0,7–1,1%. De enda förlusterna i omvandlingen blir genom friktion och värmeförluster. Effekten som krävs blir följande.

$$60 \cdot 0,01 = 0,60 \text{ MW}$$

Det krävs ca 0,60 MW för att enbart driva synkronkompensatorsanläggningen, kopplar man sedan på ett svänghjul som tillför 370 MWs till elnätet ökar det totala effektanvändandet ytterligare. Enligt svenskt näringsliv är effektbehovet för att "hålla igång" ett svänghjul vid drift ca 1 MW per 400 MWs kapacitet. I detta fall blir effektbehovet för att driva svänghjulet följande.

$$\frac{370}{400} \cdot 1 = 0,925 \text{ MW}$$

Det totala effektbehovet för anläggningen blir därav

$$0,60 + 0,925 = 1,525 \text{ MW}$$

Sätter man det i perspektiv med antalet havsbaserade vindkraftverk som skulle krävas för att kompensera för en sådan modul i elnätet blir det ungefär 19% av den totala genererade effekten som en havsbaserad vindkraftsturbin producerar vid full kapacitet.

$$\frac{1,525}{8} \cdot 100 = 19,06\%$$

Synkronkompensatorn skulle totalt bidra med ca 470 MWs vilket skulle täcka ca 0,3 % av det modellerade kravet från svenskt näringsliv.

$$\frac{470}{159000} \cdot 100 = 0,296\%$$

4.3 Hur mycket rotationsenergi kan utvinnas från kärnkraftverk

Eftersom konventionell kärnkraft bidrar med störst mängd rotationsenergi är det ett bra riktmärke att jämföra med. I Sverige producerar kärnkraftverken mellan 1040 – 1450 MW vilket enligt ekv.(1) och tabell 2 ger rotationsenergi på:

$$E_{kärn,min} = 5.9 \cdot \frac{1040}{0.9} \approx 6.817 \text{ GWs}$$

$$E_{kärn,max} = 5.9 \cdot \frac{1450}{0.9} \approx 9.505 \text{ GWs}$$

5. Analys

I det här avsnittet behandlas de resultat som har redovisats i kapitel fyra. Resultaten jämförs mot varandra samt mot andra nyckelvärden.

En jämförelse mellan de två lösningarna är intressant då de kan tillföra en liknande mängd rotationsenergi till det nordiska elnätet. Mängden rotationsenergi som en SMR-modul kan generera är enligt beräkningar i kapitel 4.1 mellan 211 MWs–1 367 MWs. Jämför man det med vad en synkronkompensator med påkopplat svänghjul kan tillföra i ren rotationsenergi är det ungefär dubbelt så mycket som en SMR-modul som producerar 50 MW.

Anledningen till att jämförelsen görs per enhet och inte i en fullskalig lösning är att båda lösningarna går att koppla ihop med fler moduler för att få en större effekt och rotationsenergi till det nordiska elnätet. En jämförelse mellan en synkronkompensatorsanläggning som presenteras i resultat och en SMR-modul är därmed missvisande då synkronkompensatorsanläggningen är flera ihopkopplade moduler medan SMR-modulen är en enhet.

Energianvändning är också något som är intressant att jämföra mellan de två lösningarna då den använda energin som går till att tillverka rotationsenergin istället skulle kunna användas av konsumenten. En synkronkompensatorsanläggning med påkopplat svänghjul har ett effektbehov på ca 2,92 MW. En SMR-modul är dimensionerad till att generera mellan 50–300 MW. En synkronkompensator genererar ingen energi som kan konsumeras utan tillför bara rotationsenergi till systemet samt reglerar den reaktiva effekten.

5.1 Hur mycket rotationsenergi behövs för att undvika uppköp av FFR

För att kompensera upp för den låga rotationsenergin har FFR upphandlats för att få upp frekvensen mot rätt nivå igen. Som nämnt i tabell 1 så skulle det behövas 159 GWs för att undvika att upphandla FFR. Den lägst uppmätta rotationsenergin under de senaste sju åren var på ca 110 GWs [9] vilket betyder att just då gjordes den största FFR upphandlingen på 49 GWs under tidsintervallet.

För att jämföra de olika teknikerna mot varandra jämförs hur många SMR:er och SK som hade behövs för att tillgodose behovet på 49 GWs. Beräkningar gör med hjälp av E_{\min} och E_{\max} från resultatdelen. Resultatet av beräkningarna är avrundade uppåt mot närmsta heltal och presenteras i tabell 8 nedan.

Tabell 7. Antal moduler/reaktorer för att tillföra 49 GWs

Antal moduler/reaktorer	Kärnkraft	SMR	SMR	SMR	SMR	SMR	SMR	SK
		50 MW	100 MW	150 MW	200 MW	250 MW	300 MW	
Minst antal	6	215	108	72	54	43	36	108*
Störst antal	8	232	116	78	58	47	39	490*

* minst antal är för SK med svänghjul medan störst antal är SK utan svänghjul

Genom att jämföra resultaten från kompensator med- och utan svänghjul märks det tydligt att genom att montera på ett svänghjul bidrar kompensatorn med 4.7 gånger mer rotationsenergi än utan ett svänghjul.

Genom att jämföra de två teknikerna mot kärnkraftreaktorer erhålles ett godtyckligt jämförelsetal till SMR:er samt SK [7]. Jämför exempelvis antalet moduler/reaktorer som hade behövts till att generera 49 GWs. Kärnkraftreaktorer som är erkända att bidra med mycket rotationsenergi hade behövt 6–8 stycken för att leva upp till målet. SMR:er kan komma upp till rätt rotationsenergi med 36 – 232 stycken beroende på storleken på reaktorerna medan det hade behövts 490 SK utan svänghjul eller 108 stycken med ett 40-tons svänghjul påkopplat.

Det här är enbart ett exempel för att demonstrera storleksordningarna på de tre olika teknikerna. Fall där rotationsenergi faller till 110 GWs är ett extremfall, vanligtvis är nivån mellan 177–211 GWs enligt figur 7.

5.2 SMR jämfört med SK

Enligt resultatet genererar vissa SMR:er och SK med ett 40 tons svänghjul lika mycket rotationsenergi. Genom att ange att en SMR ska generera 450 MWs och med H-konstanterna 3.8 s och 4.1 är det möjligt att få ett resultat där SMR:er och SK är likvärdiga rent rotationsenergimässigt. Med ekv.(1) fås svaren att en SMR på 98 – 106 MW genererar lika mycket rotationsenergi som en SK med svänghjul. Genom att jämföra skillnaden mellan teknikerna som att SMR:er genererar aktiv effekt medan SK bidrar till stabilitet kan det sägas att vid installation av SK förloras 98 – 106 MW i aktiv effekt i elnätet om det stod i ett val mellan SK och SMR. För att kompensera upp för effektförlusten skulle det behövas 6 – 13 havsbaserade vindkraftverk, beroende på vilken storlek vindturbinen har.

I kapitel 2.14 redogjordes att SK kan generera antingen 100- eller 450 MWs beroende på om den har ett svänghjul kopplat till sig eller inte. I resultatdelen beräknas att en SMR kan producera 211 – 1 367 MWs beroende på vilken storlek reaktorn har. Resultaten i sin helhet är inte chockerande då de är betydligt mindre än rotationsenergin som kärnkraft kan producera. Det som gör avgör hur stor rotationsenergi en roterande massa får beror helt och hållet på tröghetskonstanten I som beskrivs i kapitel 2.1.

Att SMR:er använder sig av mindre turbiner än kärnkraftverk är rimligt då SMR-reaktorer är mindre än kärnkraftreaktorer. Detta leder till att SMR:er har en mindre roterande massa som resulterar i att rotationsenergin blir mindre än kommersiella kärnkraftverk.

6. Diskussion

Från resultatet och analysen av H-konstanten och rotationsenergin kan det fastställas att värdena som har beräknats för SMR:er ger en godtycklig anvisning för hur mycket rotationsenergi en SMR-modul mellan 50 – 300 MW kan bidra med. Resultatet kan bidra med mer information åt aktörer inom kraftnätet angående SMR:er och hur mycket rotationsenergi de kan förvänta sig få ut av tekniken. Innan studien fanns det inga konkreta värden för hur mycket svängmassa som kunde utvinnas av SMR:er. Den tillgängliga data har bestått av hur mycket olika reaktorer kan producera och vilken typ av turbin som är anpassad till reaktorn. De aktörer som bör ha informationen om hur mycket rotationsenergi en SMR kan bidra med är turbintillverkarna eftersom de är de enda som besitter information om massa och storlek på turbinerna som är optimala för SMR:er. Dock behåller turbintillverkarna gärna den informationen hemlig så gott det går då sådan typ av information är känslig att ha offentlig. Det resulterar i att andra aktörer som arbetar med kraftnät inte erhåller sådan information.

Resultatet av hur mycket rotationsenergi en SMR kan lagra gör att aktörer kan göra bättre beräkningar på hur elnätet kan se ut i framtiden med avseende på rotationsenergi, vilka tekniker som kan användas samt hur mycket de tillför. Det bidrar även med en större konkurrens då det är möjligt att inkludera SMR:er och vindkraft i beräkningarna om man fortsätter att förutsätta att SK är vindkraftens rotationsenergi. Genom att bli mindre bundna till turbintillverkarna kan aktörer jobba mer effektivt då de redan har en god estimering av vad SMR:er kan bidra med utan att faktiskt veta det konkreta värdet. Överlag så ger studien mer tillgänglig information att ta del av.

6.1 Potentiella användningsområden för teknikerna i elnätet

En SMR har flera egenskaper som det nordiska elnätet behöver. Framförallt så tillför den en stor mängd brukbar energi till systemet. En större mängd el till nätet är positivt då det främjar den fortsatta elektrifieringen av samhället. En SMR besitter även en stor mängd rotationsenergi som tillför stabilitet till elnätet. Användningsområdet för en SMR-modul blir primärt en elproducent då det är det som konsumenten betalar för. Det finns idag inget monetärt värde för rotationsenergi så att bygga en SMR för att primärt tillverka rotationsenergi är i nuläget inte ekonomiskt försvarbart.

Om det i framtiden beslutas att rotationsenergi ska få ett monetärt värde är det förmodligen inte ekonomiskt försvarbart att bygga en SMR med avsikten att primärt tillverka rotationsenergi. Däremot blir det ytterligare incitament då modulen både kan tjäna pengar på energin producerad och rotationsenergin som genereras.

En SK har flera användningsområden. Reglering av reaktiv effekt och effektspänning samt tillförande av rotationsenergi. Regleringen av reaktiv effekt är viktig då utan den kan ingen brukbar el levereras då den reaktiva effekten levererar den aktiva. Spänningsreglering är också viktig för elledningarna då vid lågspänningsfall kan det leda till högre överföringsförluster och ökar risken för spänningskollaps vilket leder till elavbrott [32]. En SK tillför även en stor mängd rotationsenergi som tillför stabilitet till elnätet. Det primära användningsområdet för en SK i nuläget är att reglera mängden reaktiv effekt samt spänningsreglering. Att bygga SK-anläggning i primärt syfte att producera rotationsenergi är idag inte ekonomiskt försvarbart. Detta på grund av att det ej finns något monetärt värde för rotationsenergi.

Däremot om det i framtiden beslutas att rotationsenergi ska få ett monetärt värde kan det bli ekonomiskt försvarbart att bygga en SK med avsikten att primärt tillverka rotationsenergi. Detta beror givetvis på hur mycket kompensation som ges för rotationsenergi. Om ett sådant beslut blir verklighet

rekommenderas det att utföra en utförlig kostnadskalkyl i syfte att ta reda på om en sådan investering anses ekonomiskt försvarbar.

En SK kan även fungera som en indirekt källa av rotationsenergi för vindkraftverk vilket gör att vindkraftverk teoretiskt tillför både aktiv effekt och rotationsenergi precis som en SMR eller ett kärnkraftverk. En hypotetisk situation kan bli att elproducenter får ersättning vid nybyggnation ifall anläggningen ökar det nordiska elnätets rotationsenergi kapacitet. Ett exempel skulle kunna vara att vid utbyggnad av en vindkraftspark kan även SK-anläggning byggas bredvid för att tillverka nödvändig rotationsenergi som ger dem ersättning. Sannolikheten att en sådan ersättning skulle införas är däremot låg då det redan finns en stor mängd rotationsenergi i det nordiska elnätet.

6.2 Energireserver

Som presenterat i teorikapitlet finns det olika typer av energireserver som upphandlas efter behov i det nordiska elnätet. De olika energireserver har olika egenskaper då de uppfyller olika krav. FCR-reserverna används framförallt i syftet att konstant reglera frekvensen i systemet så att den inte sjunker för lågt. FFR-reserver upphandlas framförallt vid större störningar. En SMR och kärnkraftverk överlag fungerar bäst när de kan producera en jämn mängd energi. Detta beror på atomklyvningen som sker inuti reaktorn, en jämn atomklyvning är att föredra för att reaktorn inte ska producera mer energi än vad kylsystemen kan hantera. Vid ett avrop av FCR efterfrågas mer effekt, har man då en SMR som FCR-producent måste elproduktionen i reaktorn gå upp, detta i sin tur betyder att mängden atomklyvningar måste öka. FCR-reserver består i nuläget framförallt av vattenkraftverk, de är mer lämpade för uppgiften då det väldigt snabbt och effektivt kan öka energitillförseln genom att öka vattenflödet. En sådan reglering är betydligt mindre komplicerad än vad en SMR skulle behöva göra för att få samma resultat.

FFR-reserver måste ha egenskapen att på mindre än 1,3 sekunder tillföra en ökad energimängd. Detta kan bli svårt för en SMR att åstadkomma då energiutvecklingen på ett kärnkraftverk ska gå sakta för att behålla stabiliteten. Ett annan orsak till att en SMR har svårt att fungera som FFR-reserv är att SvK som håller i upphandlingen av FFR-reserver har ett krav som säger att DI för reserven ej får överstiga 50 MW [17]. En SMR är definierad att tillverka mellan 50–300 MW. Energitillverkningen är därmed för stor.

En synkronkompensator genererar inte aktiv effekt som kan förbrukas av konsument. Detta resulterar även att de ej kan agera vare sig FCR eller FFR reserv då båda reserver har ett minimikrav på tillförd effekt.

6.3 Hållbarhetsbetraktelse

Resultatet av den här studien bidrar med kunskap i hur fortsatt elektrifiering av samhället kan fortsätta utan att förlora svängmassa i systemet. Det finns två alternativ som man kan utgå ifrån, antingen fossilfri elförsörjning eller förnyelsebar elförsörjning. Den stora skillnaden mellan de två alternativen är att kärnkraft enbart ingår i fossilfri energiförsörjning. Det beror på att kärnkraft använder sig av uran som ses som en ändlig resurs och kan därmed inte ses som en förnyelsebar energikälla. Vilken av alternativen som lämpar sig bäst är svårt att besvara. Det är främst politiska värderingar som talar för antingen det ena eller det andra. Båda alternativen går att genomföra och därför kommer den här rapporten presentera ett neutralt ställningstagande till alternativen.

6.3.1 Fossilfri energiförsörjning

Idag är Sverige mer eller mindre fossilfritt då majoriteten av elproducenterna är kärn-, vatten- och vindkraft. Det betyder att SMR:er egentligen inte behöver vara en del av Sveriges framtida elförsörjning, eftersom den konventionella kärnkraften fortfarande ger ett stort bidrag till svängmassa. Däremot ska man ha i åtanke att SMR:er kommer vara modernare än de kärnkraftverk som finns idag.

Det innebär att SMR:er kommer vara effektivare i utnyttjandet av uranet och därmed minskar det farliga radioaktiva avfallet i jämförelse mot dagens kärnkraft[33]. SMR:er är därmed en bra ersättare när den konventionella kärnkraften blir gammal och behöver tas ur bruk. Genom att ersätta kärnkraften mot flera små kan även den dimensionerande incidenten sjunka. Det skulle bidra med ett stabilare elnät då det största bortfallet skulle bli mindre.

6.3.2 Förnyelsebar energiförsörjning

Vid förnyelsebar energiförsörjning kommer enbart vattenkraft erhålla rotationsenergi i systemet om inte SK implementeras i elnätet. Dock skulle det behövas otroliga mängder synkronkompensatorer för att ersätta all den svängmassa som försvunnit men även för att täcka upp för framtidens elnät som har större elförbrukning än nutidens kraftnät. En annan del som måste undersökas för att detta ska fungera är mängden reaktiv effekt som finns i nätet eftersom det är den andelen som begränsar antalet SK som kan användas. Vid denna situation kan det vara klokt att undersöka andra alternativ som kan agera energireserver.

6.4 Förbättringar

Det finns en mängd förbättringar som resulterar i att resultatet blir mer exakt. Den enskilt största felmarginalen i detta arbete är att data på tröghetsmoment till ångturbiner inte har hittats.

Tröghetsmoment på ångturbiner är svåra att hitta utan att fråga företagen som tillverkar dem. Sådan data är känslig för företag att lämna ut då de kan användas av konkurrenter. Istället utfördes en uppskattning genom att likställa H-värdet från ombyggda kolkraftverk. Trots att jämförelsen anses rimlig är det fortfarande inte säkert vad intervallet för en SMR eftersom en ombyggnation bara diskuterats utförligt i teorin. En förbättring för att få ett mer exakt H-värde för en SMR är att få tillgång till siffror på tröghetsmoment från turbintillverkare. Först då kan ett exakt värde tas fram med metoden som förklaras i bilaga 1.

En annan felkälla är hur stort behovet för mer rotationsenergi är exakt. Det modellerande kravet används som jämförelse då det påvisar en gräns där FFR inte behövs. Det finns däremot ingen exakt siffra från någon aktör på hur mycket ny rotationsenergi som ska introduceras. För att få en bättre jämförelse än mot det modellerande kravet bör en sådan siffra tas fram av myndigheter. En sådan siffra hade skapat en tydligare bild på hur många SMR:er eller synkronkompensatorer som skulle krävas för att fylla behovet.

7.Slutsats

Ett estimerat H-konstant-intervall har definierats för SMR:er som i sin tur har bidragit med ett intervall för hur mycket rotationsenergi som kan förväntas av SMR:er inom intervallet 50 – 300 MW. Intervallet har jämförts med intervallet för kärnkraft och SK för att få en uppskattning av hur effektiv SMR:er är vid lagring av rotationsenergi gentemot existerande tekniker. Om relevanta värden på turbiner erhålles, i synnerhet tröghetsmoment rekommenderas det att en ny beräkning görs med samma metod som presenteras i bilaga 1.

SMR och SK har likheter då de är modulära och går att anlägga som parker för att utvinna mer rotationsenergi från båda teknikerna. Den stora skillnaden är att SK ej kan generera aktiv effekt. Det ger SMR:er ett större användningsområde i elnätet än SK. Det konstateras att vindkraftverk indirekt kan bidra till både aktiv effekt och rotationsenergi om en SK-anläggning installeras tillsammans med en vindkraftspark.

Rotationsenergi har i nuläget inte något monetärt värde. Det gör att SK primärt ska användas för att stabilisera spänningen och den reaktiva effekten i elnätet så länge som rotationsenergi inte har ett monetärt värde. Om det i framtiden sker en förändring kring kompensation av rotationsenergi bör en vidare studie utföras. Studien kan bland annat undersöka huruvida SK är en lönsam investering med de ändrade förutsättningarna. En ny jämförelse mellan SMR och SK med tillhörande vindkraftspark kan då vara relevant att utföra.

Resultatet av hur mycket rotationsenergi SMR kan tillföra gör att aktörer inom det nordiska elnätet kan göra bättre beräkningar på hur elnätet kan se ut i framtiden med avseende på rotationsenergi, vilka tekniker som kan användas och hur mycket rotationsenergi de tillför.

Vilka energireserver som SMR:er kan bidra till har diskuterats. SMR:er kan bidra till samtliga energireserver med undantag för FFR-reserven då DI-kravet på 50 MW ej uppnås. Vattenkraft anses vara en lämpligare energikälla till FCR-reserver då de är enklare att reglera elproduktionen på vilket speglas av verkligheten då majoriteten av FCR-reserver idag utgörs av vattenkraft. En vidare studie huruvida det är ekonomiskt försvarbart att reglera ner SMR:er för att ha möjlighet bidra till FCR-reserver hade gett ett mer nyanserat resultat än vad detta projekt presenterar. Då SK ej genererar någon aktiv effekt är den ej kvalificerad till att agera som vare sig FCR eller FFR-reserv.

Referenser

- [1] P. C. Mattias Persson, "Kinetic Energy Estimation in the Nordic System," 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8442434&tag=1>. [Använd 2 Juni 2023].
- [2] Fingrid, "Inertia of the Nordic power system," [Online]. Available: <https://www.fingrid.fi/en/electricity-market-information/InertiaofNordicpowersystem/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [3] S. Näringsliv, "Högre elanvändning år 2045," Svensktnaringsliv.se.
- [4] Energimyndigheten, "energimyndigheten.se," [Online]. Available: <https://www.energimyndigheten.se/klimat--miljo/sveriges-energi--och-klimatmal/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [5] DagensPS, "dagensps.se," 23 December 2021. [Online]. Available: <https://www.dagensps.se/bors-finans/makro/finlands-nya-karnreaktor-klar-vacker-stort-intresse/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [6] Tidningen näringslivet, "Det talar emot snabb utbyggnad av ny kärnkraft," Olle Bengtsson, 2023.
- [7] Vattenfall, "Vattenfall.com," Vattenfall , [Online]. Available: <https://group.vattenfall.com/se/var-verksamhet/vindprojekt/fragor-och-svar-om-vindkraft>. [Använd 2 Juni 2023].
- [8] T. e. i. times, "Power grids regain missing inertia with synchronous condensers," September 2022. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/6ce8719d02c345d7b526070ca1d0c946/Energy%20Industry%20Times%202022-09.pdf?x-sign=BcwhkbAKFc/ShLgOPI2I27/UDBzs2U+F+zx+C7knW/JJ08jhrkrqdIdE9RfOIvGe>. [Använd 2 Juni 2023].
- [9] Strålsäkerhetsmyndigheten, [Online]. Available: <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [10] Svenskt Näringsliv, Maj 2022. [Online]. Available: https://www.svensktnaringsliv.se/bilder_och_dokument/rapporter/tai3e4_rapport_stodtjanster_webbpdf_1185904.html/Rapport_Stodtjanster_webb.pdf. [Använd 2 Juni 2023].
- [11] S. Olsson, Formelsamling i mekanik, Göteborg, 2005.
- [12] ENTSOE, "Future system inertia," [Online]. Available: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/SOC/Nordic/Nordic_report_Future_System_Inertia.pdf. [Använd 2 Juni 2023].
- [13] Uniper, "Rotationsenergi är nyckeln till en stabil elförsörjning," [Online]. Available: <https://www.uniper.energy/sv/sverige/om-uniper-i-sverige/ett-elsystem-i-balans/rotationsenergi>. [Använd 2 Juni 2023].
- [14] Svenska kraftnät, "svk.se," [Online]. Available: <https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/fcr-n/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [15] Svenska Kraftnät, "svk.se," [Online]. Available: <https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/fcr-d-upp/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [16] Svenska kraftnät, "svk.se," [Online]. Available: <https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/om-olika-reserver/fcr-d-upp/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [17] N. M. K. E. Robert Eriksson, "Synthetic inertia inertia versus fast frequency response: a definition," *IET Renewable power generation* , p. 507–514, 2017.

- [18] ENTSOE, "statnett.no," [Online]. Available: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/marked/reservemarkeder/ffr/technical-requirements-for-ffr-v1.1.pdf>. [Använd 2 Juni 2023].
- [19] IAEA, [Online]. Available: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SE>. [Använd 2 Juni 2023].
- [20] Uniper, [Online]. Available: <https://www.uniper.energy/sv/sverige/om-uniper-i-sverige/karnkraft-i-sverige>. [Använd 2 Juni 2023].
- [21] Statistikmyndigheten, "Elproduktion och förbrukning i Sverige," [Online]. Available: <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/elektricitet-i-sverige/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [22] IAEA, "Small modular reactors," [Online]. Available: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>. [Använd 2 Juni 2023].
- [23] IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments," 2020. [Online]. Available: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf. [Använd 2 Juni 2023].
- [24] Regeringen, "regeringen.se," 11 Januari 2023. [Online]. Available: <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2023/01/regeringen-foreslar-andrad-lagstiftning-om-karnkraften/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [25] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx>. [Använd 4 Juni 2023].
- [26] D. Westlén, "Fjärde generationens kärnkraft," Energiforsk.
- [27] ENTSOE, "Synchronous condenser," [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/synchronous-condenser>. [Använd 2 Juni 2023].
- [28] ABB, "Introduction to ABB Synchronous Condensers - Q&A session," ABB, 18 December 2020. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/a3c3e8b124244a7598aa1b450526784c/synchronous%20condensers%20webinar_9AKK108191_dec2020pdf.pdf. [Använd 2 Juni 2023].
- [29] WNN, "NuScale, KGHM agree to deploy SMRs in Poland," World nuclear news, 14 Februari 2022. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/NuScale,-KGHM-agree-to-deploy-SMRs-in-Poland>. [Använd 2 Juni 2023].
- [30] P. G. Ł. B. a. A. S. S. Qvist, "Retrofit Decarbonization of Coal Power Plants—A Case Study for Poland," 2020.
- [31] H. Ł. B. P. G. a. S. Q. Łukowicz, "Repowering a Coal Power Plant Steam Cycle Using Modular Light-Water Reactor Technology," 2023.
- [32] Svenska kraftnät, "Spänningsstabilitet," [Online]. Available: <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/kraftsystemstabilitet/spanningsstabilitet/>. [Använd 2 Juni 2023].
- [33]

Uniper, <https://www.uniper.energy/sv/sverige/om-uniper-i-sverige/elsystemet-i-framtiden/smr>

Bilagor

Bilaga 1

Marknadsundersökning

För att få djupare förståelse om vilka turbiner som är kompatibla till SMR:er analyserades flertalet turbiner som kan producera 50 – 300 MW. Turbinerna som analyserades var från företagen Siemens Energy, GE-Hitachi samt ABB. De analyser som gjordes var för att identifiera turbinerna från följande krav:

- Att turbinen är en ångturbin
- Att turbinen ligger i effektintervallet 50–300 MW

Om turbinmodellerna uppfyllde kraven analyserades deras tekniska specifikation för att finna värden på dimensioner samt massan på det roterande objektet. Sådana värden hittades inte. De värden som fanns att tillgå var den totala massan på turbinen som ej kan användas då det är endast den roterande massan som är relevant. Mer värden hade krävts för att räkna ut rotationsenergin enligt bilaga 1.

Metod för att uppnå Resultat

Få fram H-konstanten genom att använda sig av teknisk data från turbintillverkare/vetenskapliga källor

Som tidigare nämnt framställs svängmassa i de roterande massorna i de olika elproducerande teknikerna. Hos kärnkraftverk är det i turbinerna som energin lagras och likaså hos SMR:er. För att få fram hur mycket rotationsenergi som SMR:er inom det valda intervallet kan producera måste man använda sig av H-konstanten för att i ett senare steg kunna räkna ut rotationsenergin. Enligt tabell... i teorikapitlet kan man urskilja H konstanten för olika elproducerande tekniker, där ibland kärnkraft. Trots att SMR är kärnkraft kan man inte applicera kärnkraftens H-värde på SMR:er. Detta beror på att turbinerna hos konventionell kärnkraft är mycket större än de turbiner som kommer användas i SMR:er.

För att ta reda på H-konstanten används ekv.(1) .Det som påverkar hur stort H-värdet blir beror främst på tröghetskonstanten I. Tröghetsmomentet beskriver hur ogärna ett objekt rör på sig och beror främst på objektens form, massa samt längd. Hos turbiner är det den roterande delen som drivs av ångan som definierar en turbins tröghetsmoment. För att kunna räkna ut tröghetsmomentet behövs därför den roterande delens form, massa samt radie. Turbiner består av en högtrycks del samt en lågtrycks del.

Efter att identifierat de viktiga parametrarna m och r hos turbinerna var det dags att finna rimliga värden hos dessa. Det som efterfrågas i den här rapporten är rotationsenergi man kan utvinna från SMR:er i spannet 50 – 300 MWe vilket medför att det kommer finnas ett intervall på vad massan och radien kan väntas anta beroende på storlek på reaktorn samt olikheter hos turbintillverkare. För att få några rimliga värden gjordes marknadsanalyser på ångturbiner i produktions intervallet. Turbinerna som analyserades var tillverkade utav några kända turbintillverkare som Siemens Energy, GE-Hitachi och Mitsubishi.

Analysen gick ut på att läsa igenom produktspecifikationer för att finna massa, radie eller tröghetskonstanten som kunde användas till beräkningar av H-konstanten. Däremot misslyckades

analysen av att hitta de parametrarna som efterfrågades. Företag tenderar att dölja sådan viktig information för att säkerställa att deras produkter inte kopieras eller att andra företag konkurrerar ut dem med deras varumärke med hjälp av den typen av information.

På grund av bristen av information om massan och radie kan det inte göras några konkreta beräkningar för att få fram H-konstanten till formeln ekv.1. Utan värdena är det ej möjligt att beräkna rotationsenergin för turbinerna.

En annan slutsats som kan dras i projektet är att H-värdet kan vara olika för olika turbiner trots att de producerar lika mycket energi. Detta är på grund av att rotationsenergin består av två fria variabler (massa och radie) vilket gör att om det skulle plottas upp en graf för de möjliga H-värdena SMR:er kan anta skulle det bli ett område med en övre och undre gräns i tället för en funktion. Däremot är det inte möjligt i det här fallet att visualisera ploten då de fria variablerna fortfarande saknas.

Exempel på beräkning av turbin

P=200 MW

$$I=21200 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$S_{Nom} = \frac{P}{\cos(\varphi)} = \frac{200}{0.9} = 222.22 \text{ MW}$$

$$H = \frac{2I_{Tot}(\pi f)^2}{S_{Nom}} = \frac{2 \cdot 21200(\pi \cdot 50)^2}{222,22 \cdot 10^6} = 4.71 \text{ s}$$

Omvandling till enheten GWs fås enligt

$$H \cdot S_{Nom} = 4,71 \cdot 222,22 \cdot 10^6 = 1,046 \text{ GWs}$$

Bilaga 2

Kod till graf:

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# Definiera intervall för P och rotationsenergi
```

```
P_values = np.linspace(50, 300, 100)
```

```
rotational_energy_values = np.linspace(211, 1367, 100)
```

```
# Skapa ett rutnät av P- och rotationsenergivärden
```

```
P, rotational_energy = np.meshgrid(P_values, rotational_energy_values)

# Beräkna H-konstanten baserat på formeln  $H = \text{Rotationsenergi} / (P / 0.9)$ 
H = rotational_energy / (P / 0.9)

# Kontrollera om H ligger inom det tillåtna intervallet
H[H < 3.8] = np.nan
H[H > 4.1] = np.nan

# Plotta området som en konturplot
plt.contourf(P, rotational_energy, H, cmap='viridis', levels=5)
plt.colorbar(label='H-konstant')
plt.xlabel('Aktiv effekt (MW)')
plt.ylabel('Rotationsenergi (MWs)')
plt.title('H-konstant med avseende på aktiv effekt effekt och rotationenergi')
plt.grid()
plt.show()
```

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH
MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023
www.chalmers.se



CHALMERS