



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp  
Institutt for matematiske realfag og teknologi

## **Et litteraturstudie av frekvensavvik for Statnett SF – årsaker og anbefalinger til videre arbeid**

A Literature Study of Frequency deviations for  
Statnett SF – Findings and Recommendations for  
further Studies

Carl Otto Skjelbred  
Miljøfysikk og fornybar energi

## Forord

Med denne rapporten har jeg tilegnet med mye kunnskaper. Ikke bare om Statnett SF sine oppgaver og hvordan det nordiske kraftsystemet fungerer, men også om meg selv. Det å jobbe med en slik rapport er til tider en reise av følelser, fra glede og suksess til frustrasjon og sinne. Men til slutt klarer man å tre igjennom og samle et arbeid, denne rapporten.

Dette hadde jeg ikke fått til på egenhånd. Jeg vil gjerne rette en stor takk til min veileder Sonja Monica Berlijn for gode tilbakemeldinger og forslag til hvordan oppgaven kan utvikles videre. Til tross for hennes hektiske hverdag har satt av mye tid til å bistå meg. Jeg vil også takke min far, Erik Skjelbred for gode tilbakemeldinger og alltid tilgjengelig ved spørsmål i tillegg til å komme med gode tilbakemeldinger.

Tusen takk til Hallstein Mæland, Eivind Lindeberg og Inge Stenkløv som satte av tid til å møte med meg. De har besvart mine spørsmål og kommet med egne innspill og tanker.

Til slutt vil jeg takke min samboer, Chen Cui, for mye støtte og glede. Du var alltid ved min side når jeg trengte deg.

## Abstract

Norway is a part of the nordic synchronous area together with Sweden, Finland and Denmark (excluding Jylland). The common frequency shall be 50 Hz. But the frequency will always vary because of changes in production, consumption or unpredicted disconnection of production units or consumption units. This leads to frequency deviations. Frequency deviations may lead to damage on equipment which is connected to the power system and in the worst cases disconnecting of consumers. It has been observed an increase in the total number of frequency deviations in the nordic synchronous area all the way back to 2001. The more frequency deviate and the longer they last, the more reduced is the frequency quality. Frequency quality is measured as the number of minutes during a periode the frequency deviate the from the frequency band. The frequency band in the nordic synchronus area is  $50 \pm 0,1$  Hz. A periode may be a week, a month or a year.

Since Statnett SF has the responsibility to maintain a stable frequency in Norway, it is of interest for Statnett SF to gain knowledge about the causes of frequency deviations. With this knnowledge Statnett SF can take the correct measures to decrease frequency deviations. That is the reason this report examine what the science identifeies the reasons to frequency deviations is. The report also identifies institusions who have publiced articles on this. The purpose is to identify partners for science projects.

The research method used in this report is a literature study and personal meetings with chosen persons at Statnett SF. After basic knowledge about the nordic synchronous area was obtained by articles from Statnett SF and ENSTO-E, 8 keywords were chosen. These keywords was used in the search engines ScienceDirect, IEEE, SINTEF and Norwegian Univeristy of Science and Technology. 100 articles were chosen since they included the keyword and dealt with power systems. From the 100 articles institusions and keywrods were analysed and presented. This gave a picture of how much research it is on the diffrent areas.

The research done is mostly about how renewable energy sources impacts the power system. Since Norway have a large amount of hydropower, is this not the reason for instantaneous frequency deviations. Therefore is the recommendation for Statnett SF to increase knowledge about instantaneous frequency deviations. It is a need for more knowledge on this area, both nationally and internationally. That is the reason why there are not any partners for science projects recmmended.

## Sammendrag

Norge er en del av det nordiske synkronområdet sammen med landene Sverige, Finland og Danmark (utenom Jylland). Derfor har den felles frekvens på 50 Hz. Men frekvensen vil alltid variere grunnet endringer i produksjon, last eller uforventete utkoblinger av produksjons- eller forbrukerenheter. Det fører til frekvensavvik. Frekvensavvik kan føre til skade på utstyr koblet til kraftnettet og i verste tilfelle utkobling fra kraftnettet av forbrukere. Man har observert en økning i antall frekvensavvik i det nordiske synkronområdet fra helt tilbake til 2001. Jo oftere frekvensavvik oppstår og jo lengere de varer, jo mer redusert er frekvenskvaliteten. Frekvenskvalitet måles som antall minutter i løpet av en periode frekvensen ikke ligger innenfor det tillatte frekvensbåndet [1]. En periode kan være en uke, måned, år.

Da Statnett SF har ansvaret for å holde en stabil frekvens i Norge er det interesse for Statnett SF å ha kunnskaper om årsakene til frekvensavvik. Ved tilegning av kunnskaper kan tiltak settes i gang for å begrense frekvensavvikene. Det er årsaken til at denne rapporten undersøker hva dagens forskning peker på årsakene til momentane frekvensavvik er, samt identifisere institusjoner som har forsket på dette. Hensikten er å presentere et forskningstema med forskningspartnere for Statnett SF

Fremgangsmåten i denne rapporten var å først skaffe grunnkunnskap om frekvensavvik samt personlige møter med ansatte i Statnett SF. På bakgrunn av rapporter fra Statnett og ENSTO-E ble 8 søkeord plukket ut. Disse søkeordene representerte på best mulig måte problematikken rundt frekvensavvik. De 8 søkeordene ble brukt i søkemotorene ScienceDirect, IEEE, SINTEF og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. 100 artikler ble valgt ut da de inneholdt søkeordet og omhandlet kraftsystem. Fra de 100 artiklene ble institusjon og keywords analysert og presentert. Dette ga et bilde av hvor meget forskning det er blitt gjort på de ulike temaene.

Forskningen som er utført omhandler i hovedsak innvirkningen fornybare energikilder som vind- og solkraft vil ha på kraftsystemet. Da Norge har en meget stor andel vannkraft er ikke dette årsaker til momentane frekvensavvik i det norske kraftsystem. Derfor ble anbefalingen til Statnett SF å sette i gang et kompetanseprosjekt på momentane frekvensavvik. Siden det ikke er funnet nok forskning på årsaker til momentane frekvensavvik, viser det at det er behov for mer kompetanse på dette området. Det er årsaken til at ingen forskningspartner er presentert da kunnskapen er for lite nasjonalt og internasjonalt.

## Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Abstract .....	ii
Sammendrag .....	iii
Prefikser.....	v
1. Innledning.....	1
1.1. Problemstilling.....	3
2. Dagens kraftsituasjon .....	3
2.1. Det nordiske synkronområdet.....	4
2.2. Oversikt over produksjonen i det nordiske synkronområde.....	5
2.3. Regelverker.....	6
3. Power Quality .....	7
3.1. Voltage Quality.....	7
3.1.1. Phase Measurement Units .....	7
3.2. Frequency quality .....	7
3.3. Hva gjør TSOere for å motvirke frekvensvariasjoner .....	11
3.3.1. Planfase .....	12
3.3.2. Driftsfase .....	13
3.3.3. Strukturelle og stokastiske ubalanser .....	14
4. Forskningsmetode .....	14
5. Resultat av analyse av litteratur .....	15
5.1. Institusjoner .....	16
5.2. Keywords .....	17
6. Diskusjon av analyse.....	18
7. Anbefaling til forskningsprosjekt og forskningspartner .....	19
8. Konklusjon .....	20

## Prefikser

ENSTO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
FRR – A	Automatic Frequency restoration reserves
fos	Forskrift om systemansvar i kraftsystemet
HVDC	High Voltage Direct Current
Hz	Hertz [ $\frac{1}{s}$ ]
NCR	Challenges and Opportunities for the Nordic Power System
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
RK	Regulerkraftmarkedet
RKOM	Regulerkraftopsjonsmarkedet
ROCOF	Rate of change of frequency
SMUP	Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20
SOA	System Operation Agreement
TSO	Transmission System Operator

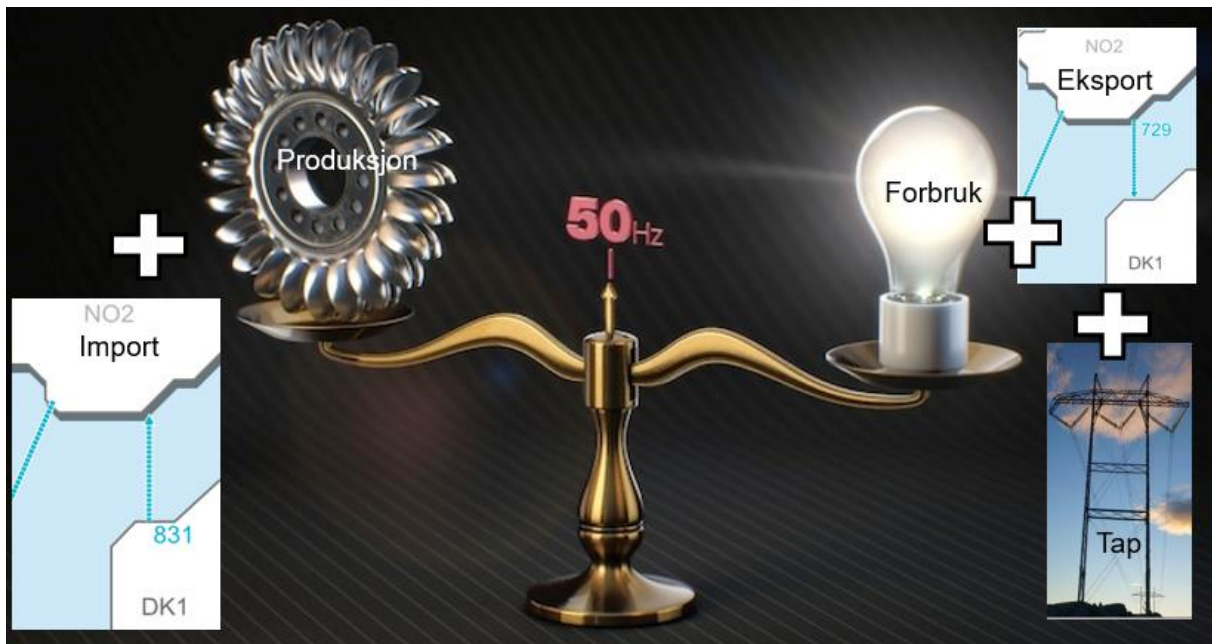
## 1. Innledning

For at et kraftsystem skal fungere er det fire elementer som må være til stede. Det er fleksibel og tilstrekkelig produksjonskapasitet, fleksibel og tilstrekkelig overføringskapasitet, fleksibelt forbruk og reserver [2]. Konsekvensene ved å ikke ha nok reserver tilgjengelig fører til ubalanser og kan være ødeleggende for kraftnettet. I det nordiske synkronområdet er det systemoperatørens oppgave å sørge for en balanse i kraftsystemet. Norge, Sverige, Finland og Danmark (utenom Jylland) er landene som utgjør det nordiske synkronområdet [3]. Disse landene har en felles frekvens på 50 Hz [3]. Det er systemoperatørens, kalt for Transmission System Operators (TSO), sin oppgave å sørge for en stabil frekvens og sette i gang tiltak når frekvensen avviker fra 50 Hz. I det nordiske synkronområdet kan frekvensen variere fritt mellom  $50 \pm 0,1$  Hz [4]. Dette kalles for det tillatte frekvensbånd. I Norge er det Statnett SF som er TSO [5]. Tiltak ved frekvens utenfor det tillatte frekvensbånd kan være aktivering av reserver for å stabilisere og restaurere frekvensen. Derfor vil Statnett SF til enhver tid overvåke frekvensen. På Statnett SF sine hjemmesider kan man se den momentane frekvensen. Dette er illustrert i figur 1.



Figur 1: Bidet viser frekvensen den 7. mars klokken 11:26 [6]. Frekvensen er i dette øyeblikket 50,11 Hz og utenfor det tillatte frekvensbånd, derfor den røde fargen.

Frekvensavvik oppstår grunnet ubalanser i kraftsystem. Ubalansene skyldes at mengden produksjon og import ikke samsvarer med mengden forbruk, eksport og tap [7]. Årsakene til dette kan være utfall av produksjons- og forbruksenheter samt utfall av kabler [8]. For å ha en balanse i kraftnettet må import og produksjon være like store som forbruk, eksport og tap. Dette er illustrert i figur 2.



Figur 2: Illustrerer elementer som påvirker frekvensen i kraftsystemet. Bildet som illustrerer import av effekt mellom Elspotområde NO2 og DK1 viser importert mengde effekt transportert den 2. mai 2017 klokken 05:53. Bildet som illustrerer eksport mellom Elspotområdene NO2 og DK1 viser mengden effekt transportert den 2. mai 2017 klokken 08:25. Bildet som illustrerer tap er hentet fra rapporten Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20 [9]. Bildet av vekten med turbinhjul og lyspæren er fra Statnett SF sin hjemmeside [8].

Som figuren viser vil frekvensen i kraftsystemer være 50 Hz når Produksjon og Import er likt med Forbruk, Eksport og Tap [10]. Import er total effekt importert fra andre kraftsystemer, Produksjon er total effekt produsert av produsenter, Eksport er total effekt eksportert til andre kraftsystemer, Forbruk er total effekt brukt av forbrukere og Tap er total effekt som er tapt i kraftsystemet ved overføring. Når disse elementene er ulike vil frekvensen variere fra 50 Hz. Som nevnt er det tillatte frekvensbånd i det nordiske synkronområdet på  $50 \pm 0,1$  Hz [4]. Når frekvens er utenfor dette blir det omtalt som frekvensavvik. Frekvenskvalitet måles som antall minutter i løpet av en periode frekvensen ikke ligger innenfor det tillatte frekvensbåndet [1]. Med andre ord man måler frekvensavvikene over en periode. En periode kan være en dag, uke, måned eller lignende. Hvis et kraftnett har en lav grad av frekvenskvalitet betyr det at frekvensavvik ofte oppstår og kan vare en lengre periode. Det er lite gunstig for enheter koblet til kraftnettet. En sterkt redusert frekvenskvalitet kan by på utfordringer for synkronområder da generatorer og turbiner fungerer mest optimalt ved en stabil frekvens. Derfor vil frekvensavvik være en mekanisk belastning for generatorene og turbinene. Dette kan føre til variasjoner i dreiemomenter eller at generatorene og turbinene blir ødelagt [11]. I verste fall kan det føre til at forbrukere blir koblet fra kraftnettet [12]. De siste 15 årene har man merket en økning i antall minutter frekvensen varierer fra 50 Hz [1]. Denne økningen er ikke bare synlig i det nordiske synkronområdet, men også i Mellom-Europa [13].

Det er av Statnett SF sin interesse å forstå i større grad hvorfor frekvensavvik oppstår og hva som kan gjøres for å unngå eller begrense dem, da frekvensavvik har en negativ virkning på kraftsystemet. I halvårsrapporten fra landssentralen 2016 peker Statnett SF på at årsakene til frekvensavvik er feil/utfall av produksjon og forbruk, økt mengde uregulerbar energiproduksjon i det nordiske



synkronområdet og i Mellom-Europa, høy utnyttelse av kraftnettet og økende utveksling på likestrømskabler mellom synkronområder, kalt High Voltage Direct Current kabler (HVDC – kabler) [14]. I en presentasjon av Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20 peker Statnett SF på at årsaken til frekvensavvik er i hovedsak strukturelle ubalanser, det vil si ubalanser mellom produksjon og forbruk [15]. Dette bekreftes av annen litteratur. I tillegg peker forskning på at de største frekvensavvikene oppstår som regel på morgen og kveld når forbruket er størst samtidig som det er en høy utnyttelse på HVDC – kabler [16]. Ved høyt forbruk og høy utnyttelse på HVDC – kabler kombinert med at markedsløsninger er i timesblokker, fører det til større ubalanser mellom produksjon og forbruk gjennom brukstidene. Dette gir opphav til frekvensavvik [16].

## 1.1. Problemstilling

Denne rapporten er et litteraturstudie hvor det skal undersøkes hva dagens forskning peker på årsaker til momentane frekvensavvik er, samt identifisere institusjoner som forsket mye på dette. Hensikten er å presentere et forskningstema med forskningspartnere for Statnett SF. Rapporten kan brukes som et innledende arbeid for et kompetanseprosjekt i Statnett SF.

## 2. Dagens kraftsituasjon

For at et kraftnett skal fungere er det viktig at flere elementer er på plass. Produksjonen må være koblet sammen med forbrukeren gjennom kraftlinjer. Kraft kan ikke lagres og følgelig må det være momentan balanse mellom forbruk og produksjon. I tillegg er det viktig at det er noen som har ansvaret for forsyningssikkerheten i kraftsystemet og som setter i gang tiltak når problemer oppstår, som for eksempel utfall av kraftlinjer. Momentan balanse og forsyningssikkerhet er TSOenes oppgave. TSO står for Transmisjon System Operator og i Norge er Statnett SF TSO. Statnett SF har blant annet som oppgave å holde frekvensen innenfor det tillatte frekvensbånd på  $50 \pm 0,1$  Hz. Norge samkjører sitt kraftsystem med de andre nordiske landene og er en del av det nordiske synkronområdet.

## 2.1. Det nordiske synkronområdet

Norge er en del av det nordiske synkronområdet sammen med landene Sverige, Finland og Danmark (utenom Jylland) [3]. Dette er illustrert i figur 3.



Figur 3: Oversikt over det nordiske synkronområdet [3]. De blå områdene viser det nordiske synkronområde.

Det nordiske synkronområdet har High Voltage Direct Current (HVDC) linjer med Europa som muliggjør handling og overføring av kraft inn og ut av det nordiske synkronområdet. Det kan innebære utfordringer for frekvensen i det nordiske synkronområdet grunnet store og hyppige endringer i effekt ved utveksling over HVDC – linjene. Dette innebærer endringer i forholdet mellom produksjon og forbruk som vil kunne utfordre den momentane balansen og derigjennom frekvensen. HVDC – linjene kan også bidra positivt ved kjøp av reserver for å restaurere frekvensen ved ubalanser.

I det felles synkronområdet har Norge, Sverige, Finland og Danmark en felles frekvens som lik for alle landene. Det byr på både fordeler og ulemper. Et eksempel på en ulempe er at ved et plutselig utfall av et større kjernekraftverk i Finland, vil dette føre til en ubalanse i hele synkronområdet, som medfører frekvensvariasjoner grunnet ubalansen mellom produksjon og forbruk som følge av hendelsen i Finland [3]. Denne frekvensendringen vil gjelde for alle de andre landene i synkronområdet.

En fordel er at alle landene kan bidra til å restaurere frekvensen ved for eksempel aktivering av reserver. Siden landene er såpass tette sammenknyttet er det viktig at de har et godt samarbeid. De nordiske TSOene er vist i tabell 1.

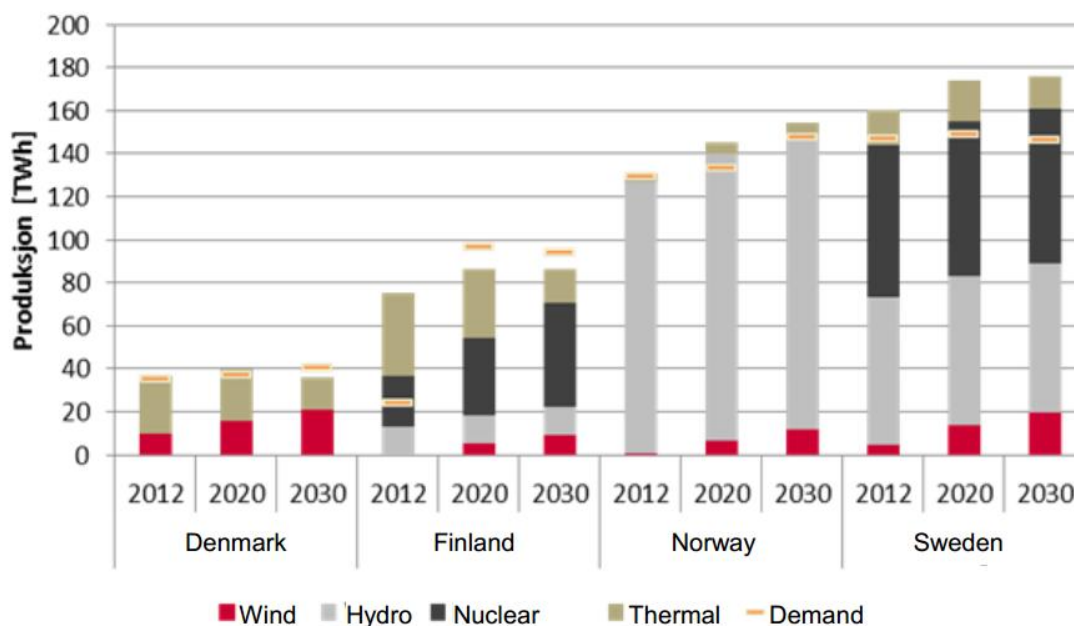
Tabell 1: Oversikt over TSOer i det nordiske synkronområdet [17].

Land	Systemansvarlig
Norge	Statnett SF
Sverige	Svenska Kraftnät
Danmark	Energinet.dk
Finland	Fingrid Oyj

Alle TSOene i det nordiske synkronområdet er medlem av European Network of Transmission System Operators (ENSTO-E) [5]. ENSTO-E representerer 42 TSOer i til sammen 35 land i Europa [18]. Bestemmelser og regelverk som blir utarbeid av ENSTO-E og godkjent av Europakommisjonen vil påvirke alle medlemslandene ved å sette krav og betingelser [19].

## 2.2. Oversikt over produksjonen i det nordiske synkronområde

For å ha et velfungerende kraftnett er det viktig at man har et sterkt kraftnett. Det innebærer at man har mulighet for å overføre energien fra produksjonen til forbrukere. Dette gjøres gjennom overføringsnettet som er delt inn i 3 kategorier. Sentralnettet med spenning mellom 300 – 420 kV, regionalnettet med spenning mellom 33 – 32 kV og distribusjonsnettet med spenning opp til 22 kV [20]. Gjennom nye forordninger initiert fra EU blir dette nå formelt delt i to nettnivåer, såkalt transmisjonsnett og distribusjonsnett. Med et sterkt kraftnett kan man på best mulig måte overføre energi fra produksjon til forbrukere. Norge er et meget langstrakt land, det betyr at energien ofte må overføres over lange avstander fra der energien blir produsert til der den blir brukt. I tillegg vil energien som bli produsert øyeblikkelig bli brukt av forbrukere og derfor søker man en kontinuerlig balanse mellom produksjon og forbruk [8]. Energien kan ikke lagres på en gunstig måte [8]. Forskning foregår på lagringsmuligheter. Figur 4 viser produksjonsinndeling for hvert land i det nordiske synkronområde.



Figur 4: Produksjons og forbruk for de nordiske landene for 2012, 2020 og 2030 [21]. Merk at solkraft er ikke inkludert i denne figuren. Det skyldes at solkraft i det nordiske synkronområdet er svært lite, men forventes å øke noe fremover

Som figuren viser kan man se at Danmark i hovedsak har vind- og termisk kraft og får mer vindkraft og mindre termisk kraft mot 2030. Finland har i hovedsak termisk- og kjernekraft og vil få mer av vind- og kjernekraft og mindre av termisk kraft. Norge har i hovedsak vannkraft og vil få mer vindkraft. Sverige har i hovedsak vann- og kjernekraft og vil få mer vindkraft. På bakgrunn av dette kan man se at det vil være en økende andel vindkraft i den fremtidige produksjonsmiksen for det nordiske synkronområdet. Dette er trenden i Europa også. Norge er i en fordelaktig situasjon siden en såpass stor andel av produksjonen kommer fra vannkraft. Vannkraft kan i stor grad bidra med balanseringsressurser, som kan regulere raskt, og man kan da raskt restaurere frekvensen ved ubalanser. Vindkraft bidrar ikke til balanseringsressurser, på samme måte. Dette kan by på utfordringer for frekvensen i fremtiden siden en større andel av produksjon kan komme fra vindkraft. Spesielt kan det være utfordrende på sommerstid når kraftforbruket er lavt og en større andel av produksjonen kommer fra andre kilder enn vannkraft [22].

### 2.3. Regelverker

Statnett SF er et statlig eid selskap og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har konsesjons- og kontrollmyndighet over Statnett SF [23]. Statnett SF er tildelt rollen som TSO fra myndighetene og det innebærer å være systemansvarlig for det norske kraftnett [16]. Som systemansvarlig har Statnett SF blant annet oppgaver som å sikre forsyningsikkerheten i Norge og drifte kraftnettet på en fornuftig samfunnsøkonomisk måte [23]. Systemansvaret til Statnett er definert ut fra forskrift om systemansvar (fos) som er vedtatt av NVE [16]. Fos definerer at Statnett SF skal tilrettelegge for et velfungerende kraftmarked og sørge for at frekvensen samsvarer med bestemmelsen fra System Operation Agreement (SOA) om at frekvensen skal være  $50 \pm 0,1$  Hz ved normal drift [24, 1]. SOA tar for seg de driftstekniske forholdene i det nordiske synkronområdet og er en avtale mellom de nordiske TSOene [3]. SOA har blant annet krav til at alle landene i det nordiske synkronområdet stiller med tertiærreserver som samsvarer med dimensjonerende feil for sitt eget system [25]. I tillegg reguleres kjøp, salg og volum av primærreserver [26].

Network Codes er en samling av regler som er under utarbeidelse av ENSTO-E [19]. Reglene stiller krav til blant annet kraftmarkeder og balanseringsressurser [19]. Hensikten med Network Codes er å opprette en trygg, konkurransedyktig og lavkarbon europeisk energisektor og et felles europeisk kraftmarked [19]. Siden de nordiske TSOene er medlem av ENSTO-E vil Network Codes bli innført i det nordiske synkronområdet. Det fører til at allerede eksisterende forskrifter og avtaler som fos og SOA må tilpasses [27].

## 3. Power Quality

Power Quality er definert som kraftnettets egenskap til å gi en ren og stabil forsyning av effekt [28]. Det ideelle er å ha en så høy grad av Power Quality at produksjonen er alltid tilgjengelig, lager en perfekt sinuskurve og er alltid innenfor spenning- og frekvensgrenser [28]. Dette er ikke tilfelle i hverdagen grunnet varierende energietterspørsel fra ulike forbrukere [28] eller ulike forstyrrelser eller ikke planlagte hendelser i kraftnettet. Også lastene i kraftnettet kan gi forstyrrelser på kraftnettet [28]. Dette gir en lav grad av Power Quality som fører til økende energi- og produksjonsforstyrrelser og høyere energikostnad.

### 3.1. Voltage Quality

I Norge er den nominelle spenningen til husholdningskunder 230 V [29]. Spenningen har et tillatt spenningsbånd hvor den kan variere mellom 207 V til 253 V [29]. Ligger spenningen utenfor dette spenningsbåndet vil man ha et spenningsavvik.

Spenningsvariasjoner er en kilde til forstyrrelser. Det skjer når linjespenningen er større eller mindre enn den nominelle spenningen. Da er det aktuelt å se på spenningskvalitet (Voltage Quality).

Hvis et kraftnett har en lav grad av spenningskvalitet kan det virke ødeleggende for enheter koblet til kraftnettet. Derfor er det ønskelig med en høy grad av spenningskvalitet. En lav grad av spenningskvalitet kan ofte merkes for forbrukere som flimrer eller at tilkoblet utstyr blir ødelagt eller får redusert funksjon. For å få et inntrykk av hvordan spenningen utvikler seg kan man måle den med ulike metoder.

#### 3.1.1. Phase Measurement Units

Phase Measurement Units (PMUer) måler amplitude og fase til strøm og spennings [30]. Ved å måle amplituder og faser forskjellige steder i kraftnettet og sammenlikne resultatene kan man få verdifull informasjon om hva skjer i kraftnettet [30]. Systemoperatøren kan motta målinger er strøm og spenningsfaser, frekvens og hvor fort frekvensen endrer seg (kalt for Rate of Change of Frequency, ROCOF) [30]. Fordelen med PMUer er at de har en veldig høy tidsoppløsning noe som gir et nøyaktig bilde av situasjonen i kraftnettet. Slik kan systemoperatøren følge utviklingen i kraftnettet veldig tett og har da mulighet for å iverksette tiltak for å unngå feil eller utfall.

### 3.2. Frequency quality

Frekvensen i et kraftsystem sier noe om hvor ofte strømmen skifter retning [31]. En frekvens på 50 Hz vil si at strømmen skifter retning 50 ganger i sekundet. Det betyr at frekvensen er direkte knyttet til omdreinings hastigheten til generatorene. I et synkront kraftsystem vil alle synkrongeneratorer rotere med den samme relative hastigheten [31]. Det betyr at ved en endring i frekvens vil alle synkrongeneratorer bli utsatt for den samme påkjennelsen. Når lasten øker i et kraftsystem fordi

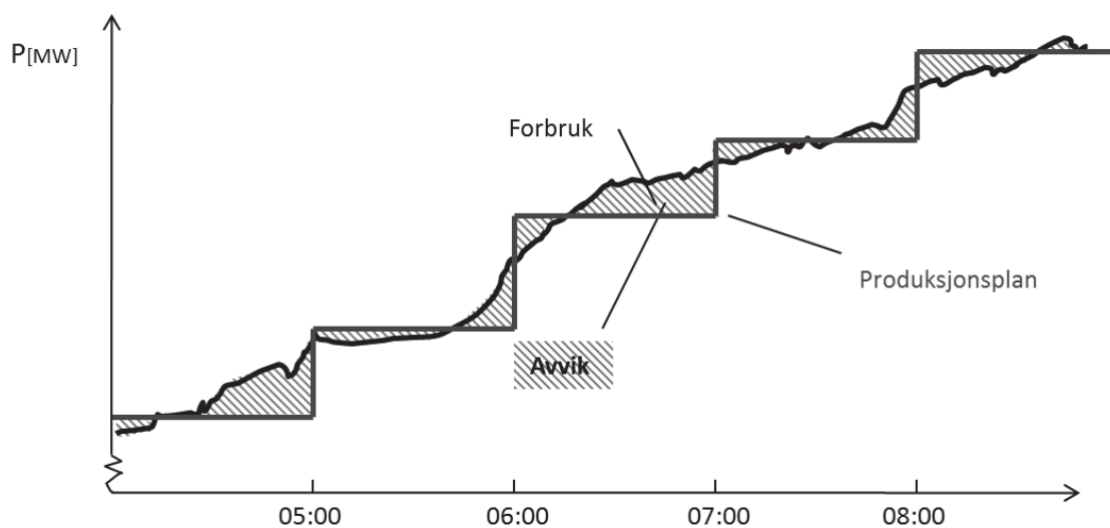
forbruket øker vil maskinene rotere saktere. Det blir tyngre å rotere. Da svarer produksjonsenhetene med å åpne for mer kraft inn på generatoren [31]. Dette gjøres i et termisk kraftverk ved å føre inn mer damp [31]. I et vannkraftverk vil det åpnes for mer vanninnsprøytning på turbinen slik at den vil rotere raskere og motvirke bremsingen som oppstår grunnet økning i last. Termiske kraftverk som kullkraftverk har en tregere responstid enn vannkraftverk [31]. det er grunnen til at Norge er i heldig posisjon da mesteparten av effekten kommer fra vannkraftverk som vist i figur 4.

Frekvens er antall svingninger per sekund og er et mål på balansen i et kraftsystem. Kraftsystemets balanse kan oppsummeres med følgende likning [7].

$$Import + Produksjon = Eksport + Forbruk + Tap \quad (1)$$

Hvor *Import* er total effekt importert, *Produksjon* er total effekt produsert av produsenter, *Eksport* er total effekt eksportert, *Forbruk* er total effekt brukt av forbrukere og *Tap* er total effekt som er tapt i kraftsystemet. Med produsenter menes aktører som produserer effekt, for eksempel kraftverk som vannkraftverk. Med forbrukere menes aktører som forbruker effekt som husstander og industri. Med tap i kraftsystemet menes tap av effekt grunnet fysiske betingelser i kraftnettet, for eksempel varmetap på overføringslinjer grunnet motstand i overføringslinjer [7]. Når høyre side av likning 1 er større enn venstre side vil frekvensen reduseres fra det nominelle utgangspunktet på 50 Hz [32]. Det vil si når forbruk, eksport og tap er større enn produksjon og import. Når venstre side er større enn høyre side i likning 1 vil frekvensen øke [32]. Det vil si når produksjon og import er større enn forbruk, eksport og tap.

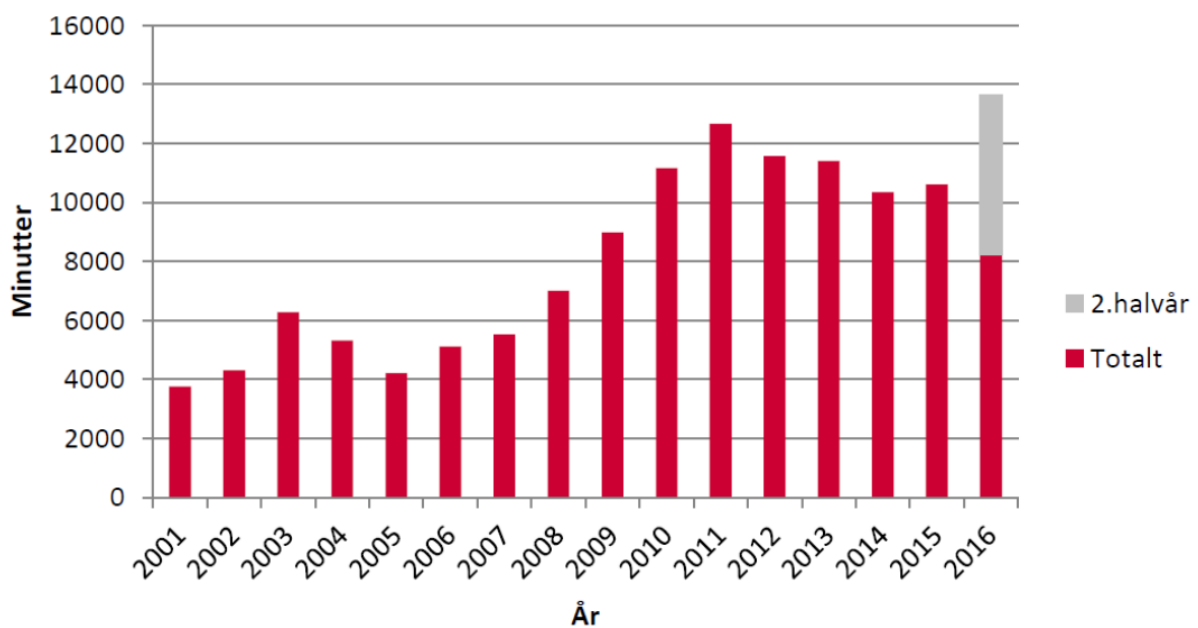
Når likning 1 er oppfylt vil frekvensen i kraftsystemet være konstant, 50 Hz for det nordiske synkronområdet. Frekvensen vil alltid variere på grunn av endringer i produksjon, forbruk, import og eksport av effekt. Endringene oppstår mer markant ved utfall av produksjonsenheter og forbruksenheter samt utfall av kabler [8]. Litteraturen peker også på at årsakene til at frekvensen varierer er økt mengde uregulerbar energiproduksjon i det nordiske synkronområdet og i Mellom-Europa, høy utnyttelse av kraftnettet og økende utveksling på overføringskabler [14] mellom synkronområder. Også den nordiske markedsløsningen skaper ubalanser. Dette kalles strukturelle ubalanser mellom produksjon og forbruk og påpekes av Statnett SF i SMUP som en årsak til frekvensavvik. Dette er illustrert i figur 5.



Figur 5: Figuren illustrerer ubalanse som oppstår grunnet dagens markedsløsning [33]. Forbruket endres kontinuerlig, mens produksjonsplanen er timesbasert. Avvikene mellom forbruk og produksjon er illustrert med skravert område. Det gir opphav til strukturelle ubalanser og deterministiske frekvensavvik.

Som figuren viser oppstår det frekvensavvik grunnet en ubalanse mellom forbruk og produksjon. Markedet har en timesoppløsning og hvor man fastsetter en produksjonsplan basert på et forventet forbruk i den aktuelle timen. Men markedet vil i praksis utvikle og endre seg kontinuerlig, ikke som stegvise endringer ved timeskift. Dette gir ubalanser særlig rundt timeskift. Ved slike ubalanser vil frekvensen endres fra 50 Hz [14].

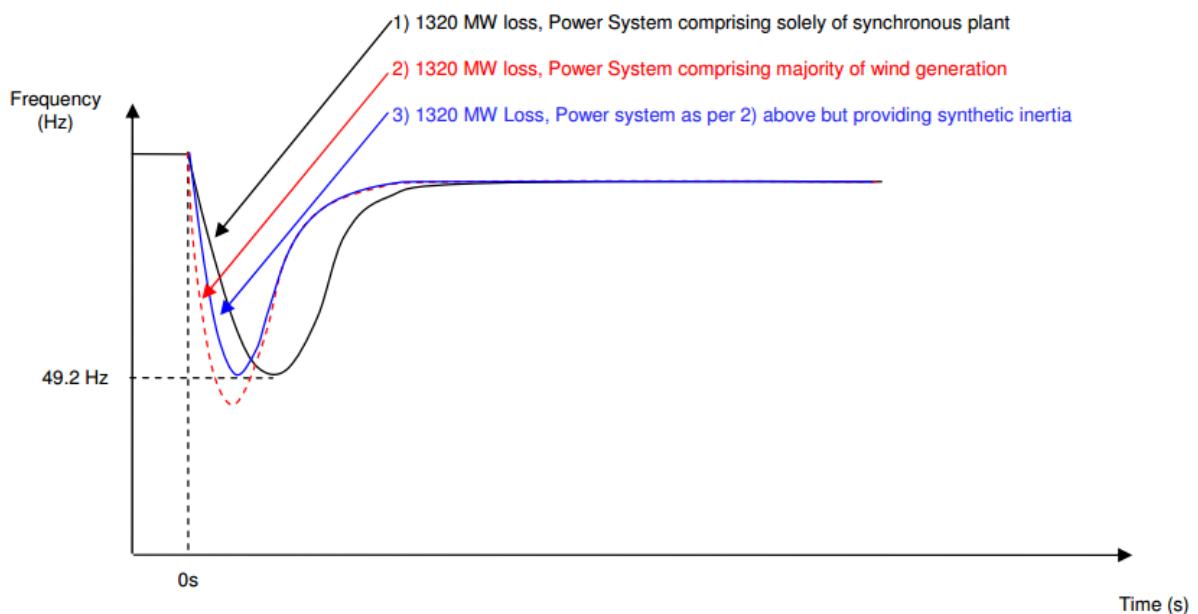
De siste 15 årene har man merket en økning i antall minutter frekvensen varierer fra 50 Hz [1]. Denne økningen er ikke bare synlig i det nordiske synkronområdet, men også i Mellom-Europa [13]. Jo oftere frekvensavvik oppstår og jo lengere de varer, jo mer redusert er frekvenskvaliteten. Frekvenskvalitet måles som antall minutter i løpet av en periode frekvensen ikke ligger innenfor det tillatte frekvensbåndet [1]. En periode kan være en uke, måned, år. Antall minutter med frekvens utenfor det tillatte frekvensbåndet for det nordiske synkronområdet er vist i figur 6.



Figur 6: Viser den historiske utviklingen av frekvenskvaliteten for det nordiske synkronområdet [34].

Som man ser fra figuren har frekvenskvaliteten blitt redusert de siste 15 årene og var på det svakeste i 2011. Etter dette kan man se en forbedring i frekvenskvalitet. Dette kan skyldes tiltak som Statnett SF har innført for å bedre frekvenskvaliteten [35]. Et av tiltakene som antas å ha hatt en positiv innvirkning er tilgangen på sekundærreserver Automatic Frequency restoration reserves (FRR-A) [1]. De nordiske TSOene har satt opp et midlertidig mål for frekvenskvaliteten. Det midlertidige målet er at frekvensen ikke skal være mer enn 10 000 minutter utenfor det tillatte frekvensbåndet per år [12]. Dette midlertidige målet ble oppjustert fra 6 000 minutter per år [12]. Før dette var grensen på 1 200 minutter per år [36]. En sterkt redusert frekvenskvalitet kan by på utfordringer da generatorer og turbiner fungerer mest optimalt ved en stabil frekvens. Frekvensavvik kan være en mekanisk belastning for generatorene og turbinene. Dette kan føre til variasjoner i dreiemomenter eller at generatorene og turbinene kan bli ødelagt [11]. I verste fall kan det føre til at forbrukere blir koblet fra kraftnettet [12].

Som tidligere nevnt er Norge i en gunstig posisjon grunnet mye vannkraft som har en hurtig regulerings­tid. I tillegg stiller vannkraft med en stor mengde roterende masse. Nye produksjonskilder som vind- og solkraft har andre tekniske egenskaper. De produserer når det blåser eller er sol og dermed er de mindre regulerbare. De bidrar heller ikke med roterende masse i kraftsystemet på samme måte som vannkraft og termisk kraft. Det fører til utfordringer, spesielt på sommer­tid når vind- og solkraft står for mesteparten av energien i det nordiske synkronområdet. Da vil den roterende massen være lav og i det nordiske synkronområdet er da kraftsystemet i større grad utsatt for mer alvorlige frekvensavvik. Derfor er det av interesse å se på hvor hurtig frekvensen endres ved avvik og hvor stort det maksimale avviket er. Dette kalles for Rate of change of frequency (ROCOF). Roterende reserver vil være med på å begrense det maksimale avviket av frekvens [37]. Hvis dette maksimale frekvensavviket er for stort kan generatorer koble seg fra kraftnettet grunnet innstilling av vernet på generatorene [38]. Dette vil føre til ytterligere frekvensavvik og kan føre til total kollaps av kraftnettet [38]. Derfor er det viktig at et kraftnett har tilstrekkelig med roterende reserver tilgjengelig til enhver tid. Figur 7 viser forskjellene i frekvensavvik ved forskjellig mengde roterende reserver.



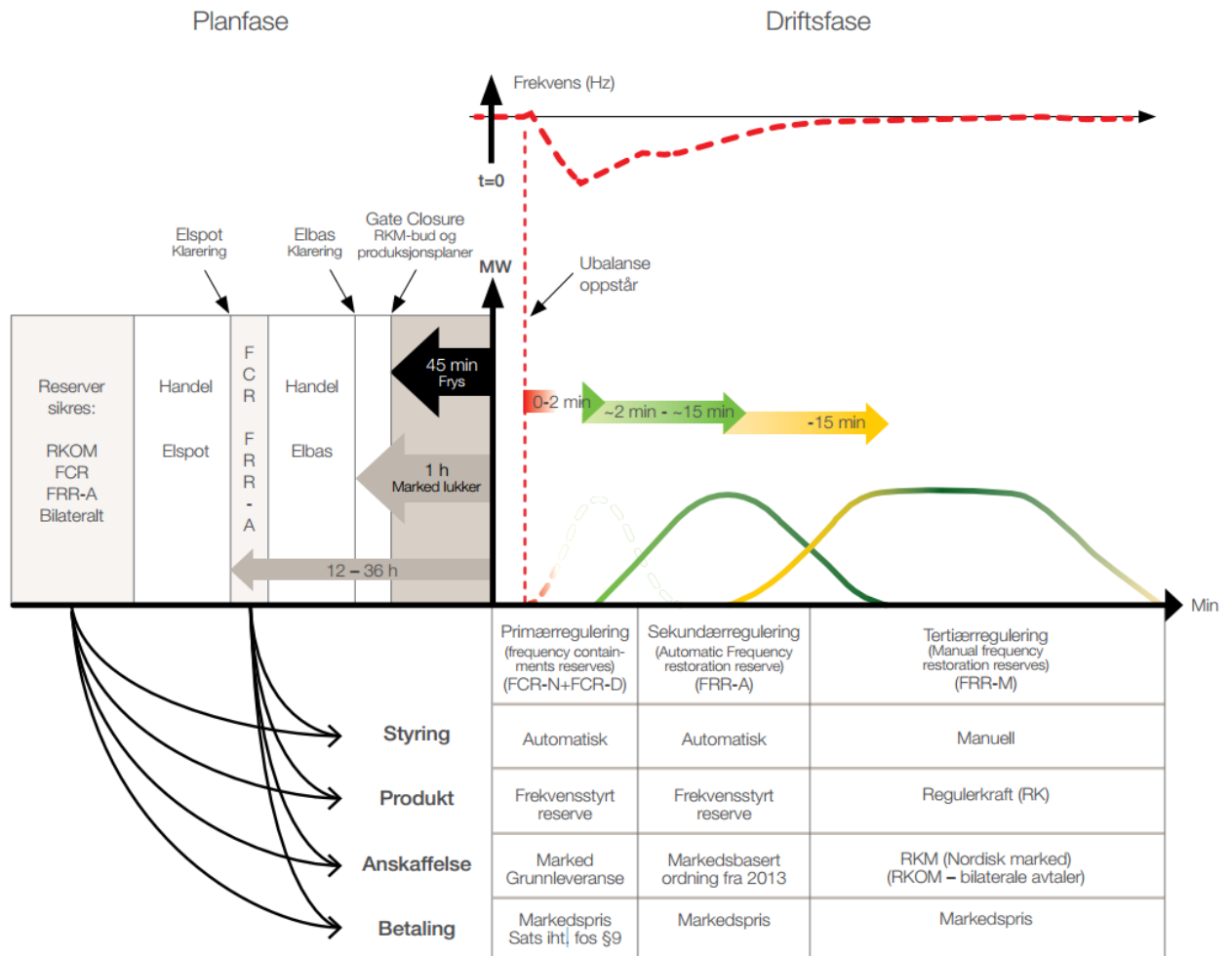
Figur 7: Figuren illustrerer innvirkning på maksimalt frekvensavvik ved forskjellig mengde roterende masse i kraftsystemet [39].

Som figuren viser vil maksimalt frekvensavvik være mindre når det er større mengde roterende reserver i kraftsystemet. Linje 1 er tilfelle når kraftsystemet består kun av synkrone kraftverk som vannkraft og termisk kraft. Da er det mye roterende masse tilgjengelig i kraftverket. Linje 2 viser hva som skjer når majoriteten av kraftsystemet består av vindkraft. Her er maksimalt frekvensavvik større enn for linje 1 og inntreffer tidligere, men frekvensen blir restaurert tidligere. Linje 3 er et kraftsystem som består i hovedsak av vindkraft som for linje 2, men her gir vindkraften syntetisk treghetsmasse. Med syntetisk treghetsmasse menes når vindmøller bidrar til frekvensgjenopprettning ved å benytte kinetisk energi som er lagret i dem når de er i drift [40]. Dette gjøres ved å koble om og regulere vindmøllen slik at den har mulighet til å bidra [40]. Her ser man at maksimalt frekvensavvik er tilsvarende stort som når kraftsystemet bestod i hovedsak av synkrone kraftverk som vannkraft og termisk kraft, linje 1. men frekvensen blir hurtigere stabilisert.



### 3.3. Hva gjør TSOere for å motvirke frekvensvariasjoner

TSOene har flere forskjellige verktøy tilgjengelig for å forsøke å holde frekvensen så stabil som mulig og sette i gang tiltak når frekvensavvikene oppstår. Dette gjøres blant annet via kraftmarkeder og aktivering av reserver. Sammenkobling er presentert i figur 8.



Figur 8: Oversikt over hvordan reserver anskaffes, hvordan kraftmarkedet fungerer og aktiveringsperioder for reserver [41].

Som figuren viser er styringen av kraftnettet delt opp i to overordnede områder, planfase og driftsfase. Planfasen er en planleggingsfase hvor man kjøper og selger effekt i perioden før driftstimen. Driftstimen er den faktiske driften og viser hvilke tiltak systemoperatørene kan sette i gang når et frekvensavvik oppstår.

### 3.3.1. Planfase

Planfasen er fasen før driftstimen og her spiller kraftmarked Nord Pool en viktig rolle [42]. Nord Pool er et kraftmarked som er bygget opp som en børs. På denne børsen samler man tilbud om kjøp og salg av kraft i elspotmarkedet, som er et marked for den påfølgende dagen. Systemoperatøren gir tilgjengelige overføringskapasiteter i kraftnettet til børsen så den blir hensyntatt i klaringen på børsen. Dette er et viktig virkemiddel for å planlegge kraftflyten og balansen i kraftnettet.

Nord Pool er Europas største kraftmarkedet [43]. Nord Pool benyttes av femten europeiske land, deriblant de nordiske landene samt Storbritannia og Tyskland [43]. Det er adgang også for å ha flere konkurrerende børser i et marked.

Reserver blir anskaffet av TSOen gjennom bilaterale avtaler eller handlet i Regulerkraftmarkedet (RK). Bilaterale avtaler er en avtale over lengere tid mellom to aktører om tilgang til effekt og kan fungere som primær-, sekundær- eller tertiærreserve [44]. I RK blir alt av tertiærreserver for det nordiske synkronområdet handlet med [44]. Hensikten med RK er at TSOene skal ha nok reserver tilgjengelig til enhver tid for å kunne ha et sikkert kraftsystem. RK foregår på den måten at aktører byr inn en pris som aktøren er villig til å ta betalt for å forandre sin produksjon eller forbruk [25]. Regulerkraftopsjonsmarkedet (RKOM) er laget for å garantere å ha nok reserver i RK [44]. Tilbydere av denne tjenesten får betalt for deltakelse [45]. Større forbrukere kan by inn effekt i dette markedet i form av utkobling.

Etter at reserver er sikret gjennom bilaterale avtaler og RK benyttes Elspot. Elspot er et kraftmarked for levering av effekt for neste døgn og omtales ofte som day-ahead marked [46]. Budene er konstante innenfor hver time. Aktører kan enten selge eller kjøpe effekt. Dette gjøres i blokker som er oppdelt i hele timer. Kjøp og salg stoppes klokken 12 før markedet settes i gang neste dag [47]. Alle bud for kjøp og salg blir samlet sammen til en generell tilbud- og etterspørselskurve [48]. Denne kurven blir dermed gjort tilgjengelig og aktører får beskjed om hvor meget de får selge eller kjøpe avhengig av aktørens bud [48]. TSOene bruker denne kurven som et grovt overslag for hvordan kraftflyten vil være neste dag og kan med denne kunnskapen bestemme hvor mye reserver som bør være tilgjengelig [47]. Deretter kjøper inn TSOene kjøper inn primær- og sekundærreserver.

Etter at Elspot er lukket åpnes det for Elbas. Elbas omtales som intra-day marked og består også her av timeskontrakter. Handling i Elbas foregår kontinuerlig hele døgnet. Handling i Elbas stenger en time før selve driftstimen. Hensikten med Elbas er å sikre en bedre balansering i kraftnettet gjennom døgnet og hver enkelt time [49]. Deretter er kraftmarkedet lukket for handel inn til driftstimen.

### 3.3.2. Driftsfase

Når frekvensavviket først oppstår vil reserver bli aktivert for å begrense maksimalt frekvensavvik og restaurering av frekvens. Disse reservene er presentert i tabell 2.

Tabell 2: Oversikt over reserver.

Reserve	Hensikt	Responstid
Roterende masse	Dette er den første aktiveres. Den blir umiddelbart aktivert og roterende masse blir omgjort til elektrisk energi [50]. Vil automatisk og øyeblikkelig forsøke å motvirke endringen i frekvensen og virke stabiliserende på frekvensen [51]	Umiddelbart
Normaldriftsreserver (FCR-N)	Aktiveres etter den roterende massen. Automatiske funksjoner for å håndtere og stabilisere ubalansen [26]. Aktiveres når frekvensen avviker fra 50,00 Hz i intervallet $50 \pm 0,1$ Hz [52]	Innen 5 sekunder og fullstendig aktivert etter 30 sekunder [26]
Driftsforstyrrelsesreserve (FCR-D)	Aktiveres etter den roterende massen. Automatiske funksjoner for å håndtere og stabilisere ubalansen [26]. Aktiveres ved avvik fra tillatt frekvensbånd [52]	Innen 2-3 minutter. Er en forlengelse av FCR-N [26]
Sekundærreserver (FRR-A)	Skal restaurere frekvensen og på denne måten frigjøre primærreserver slik at de er tilgjengelige ved nye utfall. Automatisk aktivering [53]	Innen 120-210 sekunder [26]
Tertiærreserver (FRR-M)	Benyttes for frekvensregulering for på denne måten frigi primær- og sekundærreserver samt brukt til å håndtere flaskehals. Aktivering foregår manuelt [44]	Innen 15 minutter [26]

Disse reservene blir handlet i egne markeder [54]. Til tross for at man har et bilde av hvordan kraftflyten kommer til å være i driftstimen på bakgrunn av handel i markedene i planfasen vil det alltid oppstå ubalanser i driftstimen. Det kan skyldes endring i vær som påvirker forventet mengde produsert effekt fra fornybare energikilder, endringer hos større forbrukere eller uforventede utfall av produksjonsanlegg eller overføringslinjer [54]. Fordelen med Norge er at det er mye vannkraftproduksjon tilgjengelig. Dette er en reserve som raskt kan reguleres for å stabilisere og restaurere frekvensen, i tillegg til å bidra med mye roterende masse.

Ettersom strøm som blir produsert blir øyeblikkelig brukt, er dette en momentan balanse [55]. Frekvensavvik i denne perioden kalles for momentane frekvensavvik. Etter dette har man kortsiktig frekvensavvik, mellomiktig frekvensavvik og langsiktig frekvensavvik. Disse samsvarer med aktivering av reserver. Det vil si at et frekvensavvik er oppfattet som kortsiktig i perioden 0-2 minutter, mellomiktig i perioden 2-15 minutter og langsiktig fra 15 minutter og utover.

### 3.3.3. Strukturelle og stokastiske ubalanser

Når frekvensavvik oppstår kan de deles i to hovedgrupper. Frekvensavvik grunnet strukturelle ubalanser eller stokastiske ubalanser. Med strukturelle ubalanser menes ubalanser som skyldes en repetitiv og forutsigbar ubalanse mellom produksjon, forbruk og utveksling av effekt [15]. De frekvensavvik som oppstår grunnet dagens markedsløsning er en strukturell ubalanse [15]. Frekvensavvik grunnet dette kalles for deterministisk frekvensavvik [15]. Stokastiske ubalanser er ubalanser som oppstår grunnet plutselige og uforutsigbare hendelser som utfall av kraftlinjer, transformatorer og produksjonsenheter eller prognosefeil [15]. De fleste frekvensavvik skjer rundt timeskift når store endringer skjer i kraftnettet grunnet rask endring i forbruk, produksjon og overføring på HVDC – kabler [56]. Dette skjer ved fikserte timer på morgen og kveld og derfor har disse frekvensavvikene en deterministisk natur [56].

## 4. Forskningsmetode

Forskningsmetoden som er brukt for å besvare problemstillingen er litteraturstudie samt personlige møter med ansatte i Statnett SF. Først ble det tilegnet kunnskap om det nordiske synkronområdet og utfordringer det står ovenfor gjennom rapporter og presentasjoner som Statnett SF har vært med å utforme. Her ble spesielt to artikler brukt, Challenges and Opportunities for the Nordic Power System (NCR) og Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20 (SMUP). I tillegg ble relevante artikler funnet fra internett. Søkeord som «impact on frequency quality», «the impact on frequency because of ramping» og «Frequency deviations» ble brukt i søkemotoren Google. Her ble spesielt Deterministic frequency deviations – root causes and proposals for potential solutions brukt. Etter at grunnkunnskaper var tilegnet, ble det avtalt møter med utvalgte personer i Statnett SF. Hensikten med møtene var å forhøre seg om hvordan Statnett SF selv har tatt tak i utfordringen med frekvensavvik. Det ble møtt med Hallstein Mæland, Eivind Lindeberg og Inge Stenkløv.

Etter at å ha opparbeidet en bedre innsikt om utfordringen med frekvensavvik, ble litteratur funnet på internett. I halvårsrapporten fra landssentralen 2016 peker Statnett SF på at årsakene til frekvensavvik er feil/utfall av produksjon og forbruk, økt mengde fornybar energiproduksjon i det nordiske synkronområdet og i Mellom-Europa, høy utnyttelse av kraftnettet og økende utveksling på HVDC - kabler mellom synkronområder [14]. I tillegg trekkes det frem at årsaken til frekvensavvik er i hovedsak strukturelle ubalanser, det vil si ubalanser mellom produksjon og forbruk [15]. På bakgrunn av litteraturen fra Statnett SF og annen litteratur er søkeord brukt. Søkeordene er presentert i tabell 3.

Tabell 3: Oversikt over søkeord.

Frequency quality
Frequency deviation
Deterministic frequency deviations
Structural imbalances
Stochastic imbalances
15 minutes market frequency
Inertia frequency deviation
Imbalances caused by forecast errors

Hensikten med søkeordene var å få et bilde av hvor meget forskning er gjort på forskjellige områder. Søkeordene dekker opp problematikken rundt frekvenskvalitet og trekker frem forskning gjort på utvalgte løsninger for å forbedre frekvenskvaliteten. Disse søkeordene ble brukt i søkemotorene ScienceDirect (advance search med Energy og Engineering), IEEE og SINTEF. I tillegg ble flere artikler som Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet har publisert om Power systems undersøkt. Hensikten med å bruke SINTEF og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet var å få et inntrykk av status på forskning i Norge. Researchgate og IEEE ble brukt for å få inntrykk av status på forskning internasjonalt. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet og SINTEF ble plukket ut blant norske institusjoner på bakgrunn av tidligere søk som viste at de har bistått i flere artikler på området. De har derfor vist seg å ha kunnskaper på området i større grad enn andre norske institusjoner. For å få et innblikk på dagens forskning ble kun sammendraget i artikler lest. Søkeordene ble brukt i søkemotorene og 100 artikler ble valgt ut da de inneholdt søkeordet og omhandlet kraftsystem. Fra de 100 artiklene ble institusjon og keywords analysert. Med institusjon menes universitet eller forskningsselskap. Det ble gjort to analyser. Et nasjonalt og internasjonalt. Dette var for at ikke institusjonene SINTEF og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet skulle forstyrre resultatene da de er brukt som søkemotorer. Alle artikler er samlet i vedlegg 1. Alle keywords ble samlet i vedlegg 2. Alle institusjoner ble samlet i vedlegg 3. Hensikten med dette var å se hvilke institusjoner som gikk igjen for å finne de som har utført mye forskning på området rundt frekvenskvalitet. Hensikten med dette var å trekke frem hvilke keywords som gjentok seg i stor grad. Til slutt ble det presentert et forslag til forskningsprosjekt for Statnett SF på bakgrunn av analysen gjort av litteraturen. Forskningspartner ble valgt ut etter kunnskap om forskningsprosjektet.

## 5. Resultat av analyse av litteratur

Basert på analysen presentert i denne rapporten ble institusjoner presentert. De ble delt opp i to grupper, nasjonale og internasjonale institusjoner. Basert på analysen av keywords ble det presentert de keywords som gjentok seg i stor grad. Disse keywords ble sortert etter tema

## 5.1. Institusjoner

Med institusjoner menes universiteter eller forskningsselskaper. De institusjonene som er presentert i dette kapitlet er institusjoner som har utgitt to eller flere artikler. De internasjonale institusjoner er vist i tabell 4 og de nasjonale i tabell 5. Hensikten med å trekke frem disse institusjonene er for å vise hvilke institusjoner som har mye kunnskaper på området frekvenskvalitet.

Tabell 4: Oversikt over internasjonale institusjoner.

Institusjon	Antall artikler
Technical University of Denmark	6
ETH Zurich	3
North China Electric Power University	3
University of Malaya	3
Cardiff University	2
Deakin University	2
Imperial College London	2
Reiner Lemoine Institut	2
Risø National Laboratory	2
RWTH Aachen University	2
Sahand University of Technology	2
Tsinghua University	2
TUBITAK UZAY	2
Universitat Politècnica de Catalunya	2

Som tabellen viser har Technical University of Denmark flest publiseringer internasjonal, etterfulgt av ETH Zurich, North China Electric Power University og University of Malaya.

Tabell 5: Oversikt over nasjonale institusjoner.

Institusjon	Antall artikler
SINTEF	25
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	17

Som tabellen viser har SINTEF og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet et stort antall artikler.

## 5.2. Keywords

Totalt sett er det 499 keywords fra de 100 artikler analysert. Enkelte temaer gjentok seg blant keywords. Temaene er presentert i tabell 6.

Tabell 6: Oversikt over temaer på bakgrunn av keywords.

Tema	Forklaring på tema	Antall keywords
Fornybar energiproduksjon	Handler om hvordan fornybar energiproduksjon som vann-, vind- og solkraft kan påvirke kraftsystemet	63
Reserver	Handler om hvordan reserver kan påvirke kraftsystemet og hvordan de kan bli handlet med i et kraftmarked	35
Lagringsmuligheter	Handler om hvordan man kan lagre effekt til bruk senere ved behov	22
HVDC – kablers påvirkning i synkronområde (ikke bra	Handler om hvordan HVDC – kabler påvirker synkronområdet i form av effekt overført og ramping	13
Forbrukssides bidrag til balansering	Handler om hvordan forbrukssiden kan bidra aktiv til balansering i kraftsystemet	11
Treghetsmasse	Handler om hvordan treghetsmasse bidrar til frekvensstabilitet	10

Under Fornybar energiproduksjon ble keywords som Hydroelectric power plant, Pumped storage hydro unit og Wind power sortert. Keywords som ble sortert under Reserver var keywords som omhandlet reserver. Det vil si keywords som for eksempel Ancillary services, Balancing power og primary frequency control. Under tema Lagringsmuligheter ble keywords som for eksempel Battery energy storage system, Electric vehicles og Fuel cell sortert. Under tema Forbrukssides bidrag til balansering finner man keywords som Demand as frequency controlled reserve og Demand response. Under HVDC – kabel ble keywords som HVDC links og transmission expansion planning sortert.

Som tabellen viser er det gjort mest forskning på temaet fornybar energiproduksjon. Etter det kommer temaet reserver. Det temaet som er gjort minst forskning på, i dette utvalget av artikler, er hvordan treghetsmasse.

De institusjoner som har forsket på treghetsmasse i kraftsystemet er presentert i tabell 7.

Tabell 7: Oversikt over institusjoner som har forsket på treghetsmasse og i hvilken sammenheng.

Institusjon	Område for treghetsmasse
University Putra Malaysia	Treghetsmasse ved vindkraft
University of Denver	Treghetsmasse ved vindkraft
Chonbuk National University	Treghetsmasse ved vindkraft
National Renewable Energy Laboratory	Treghetsmasse ved vindkraft
SINTEF	Treghetsmasse ved vindkraft og i smartgrids
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Treghetsmasse ved vindkraft og i smartgrids
Cardiff University	Hvordan asynkrone maskiner påvirker kraftsystemet og treghetsmasse
Al-Mustansiriyah University	Hvordan asynkrone maskiner påvirker kraftsystemet og treghetsmasse
Iraq Ministry of Science and Technology	Hvordan asynkrone maskiner påvirker kraftsystemet og treghetsmasse
Technical University of Denmark	Hvordan asynkrone maskiner påvirker kraftsystemet og treghetsmasse
University of Malaya	Treghetsmasse ved vind- og solkraft
Iran University of Science and Technology	Treghetsmasse i mikrogrids og på kraftsystemer med flere fornybare energikilder
Budapest University of Technology and Economics	Treghetsmasse i vindkraft og lagringsmuligheter

Med treghetsmasse ved vindkraft menes hvordan et kraftsystem blir påvirket av en større mengde vindkraft, hvordan dette påvirker treghetsmassen i kraftsystemet og konsekvensene for frekvensen ved frekvensavvik.

## 6. Diskusjon av analyse

Tabell 3 presenterer søkeordene som ligger til grunn for litteraturanalsen gjort i denne rapporten. Disse søkeordene er plukket ut på bakgrunn av litteratur på området frekvenskvalitet. Søkeordene dekker årsaker til en svakere frekvenskvalitet og mulige løsninger for å forbedre frekvenskvaliteten. Søkeordene dekker ikke alle områder rundt frekvenskvalitet da dette er et stort og komplisert tema. Det betyr at resultatene er mer en oversikt enn et dypdykk i temaet. Det er valgt å gjøres på denne måten da dette er en masteroppgave og tiden er begrenset. I tillegg kan det være av større interesse for Statnett SF å få et generelt bilde av forskning.

Tabell 4 og 5 viser hvilke internasjonale institusjoner som gikk igjen med publiseringer. Blant de nasjonale institusjonene var SINTEF som hadde flest publikasjoner. Det er ikke overraskende grunnet at SINTEF ble brukt som søkemotor. Blant de internasjonale institusjoner er det Technical University of Denmark som har flest publikasjoner.

Tabell 6 viser temaer for keywords. Her ser man at fornybar energiproduksjon er i størst grad omtalt. Spesielt er vindkraft diskutert her. 38 av 63 keywords innenfor dette temaet inneholdt ordet wind. Det tyder på at mye forskning er fokusert rundt dette område. Dette er av noe mindre interesse for Statnett SF da Norge har en meget stor andel vannkraft. Selv om vindkraft vil øke i fremtiden, vil det



ha begrenset innvirkning på frekvenskvaliteten. Derfor er det av større interesse å fokusere på de andre områdene, spesielt forskningen på reserver. Technical University of Denmark har i hovedsak artikler om vindkraft. De er derfor ikke sett på som aktuelle forskningspartnere.

Tabell 7 viser en oversikt over institusjoner og deres forskning på treghetsmasse. Som tabellen viser har forskningen i hovedsak fokusert på utfordringer for kraftsystem med tanke på momentane balanser grunnet lite treghetsmasse. Det er en mindre mengde treghetsmasse i kraftsystemet grunnet mer innføring av asynkrone maskiner som ikke bidrar til treghetsmasse. Dette er tilfelle for sol- og vindkraft. Vindkraft kan bistå ved syntetisk treghetsmasse. Dette betyr at forskning som er funnet på årsaker til momentane frekvensavvik er lite aktuelt for Norge grunnet den store mengden vannkraft.

Tidligere i rapporten er 10 000 minutters grensen for frekvensavvik omtalt. Denne målestokken har en svakhet da den ikke omtaler hvor kritisk en hendelse kan være. Dette er spesielt tydelig om sommeren når forbruket er lavt og roterende masse i kraftsystemet er lavt [57]. Det betyr at frekvens kan ha et stort avvik. ROCOF kan være stor i disse situasjonene da det sier noe om hvor stort det maksimale frekvensavviket blir. Derfor er det en anbefaling til Statnett SF å lage en ny måte å måle frekvenskvalitet på da den nåværende grensen ikke tar hensyn til alvorlighetsgraden av frekvensavviket, for eksempel ved lav roterende masse i kraftsystemet.

Mange av artiklene som er analysert tar for seg virkningen på andre kraftsystemer enn det nordiske synkronområdet. I tillegg er flere av resultatene basert på simuleringer. Resultater fra simuleringer gjort på andre synkronområder er ikke nødvendigvis overførbart til det nordiske synkronområdet. Elementer som størrelsen på kraftnettet, produksjonssammensetning, last og lignende vil variere fra synkronområdet til synkronområdet [58]. Derfor bør hvert system studeres separat.

Totalt ble 100 artikler funnet og analysert. Ved et større antall artikler presentert vil man få et enda bedre bilde av situasjonen på dagens forskning. Nok en gang er dette kun en masteroppgave så tiden er begrenset. Men 100 artikler ble sett på som nok artikler for å få et oversiktsbilde av status på forskning.

## 7. Anbefaling til forskningsprosjekt og forskningspartnere

Den forskningen som er funnet på årsaker til momentane frekvensavvik er lite aktuelt. I tillegg er det ikke mye forsket på dette. Størsteparten av forskningen ser på innvirkninger fornybar produksjon vil ha på frekvensen og flere institusjoner peker på at strukturelle ubalanser er årsaken til frekvensavvik. Dette er ikke årsaken til momentane frekvensavvik i det norske kraftnett grunnet stor mengde vannkraft. Anbefalingen til Statnett SF er å sette i gang et kompetanseprosjekt på momentane frekvensavvik.

Som resultatet av analysen viser er ikke mye forskning gjort på område rundt årsaker til momentane frekvensavvik og det er derfor det er utfordrende å presentere en forskningspartner på området. Derfor blir det ingen forskningspartner presentert.

## 8. Konklusjon

Denne rapporten undersøkte hva dagens forskning peker på årsakene til momentane frekvensavvik er, samt identifisere institusjoner som har forsket på dette. Dette ble gjort ved å først skaffe grunnkunnskap om frekvensavvik. På bakgrunn av rapporter fra Statnett og ENSTO-E ble 8 søkeord plukket ut. Disse søkeordene representerte på best mulig måte problematikken rundt frekvensavvik. De 8 søkeordene ble brukt i søkemotorene Science Direct, IEEE, SINTEF og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. 100 artikler ble valgt ut da de inneholdt søkeordet og omhandlet kraftsystem. Fra de 100 artiklene ble institusjon og keywords analysert og presentert. Dette ga et bilde av hvor meget forskning det har vært på de ulike temaene.

Forskningen som er utført omhandler i hovedsak innvirkningen fornybare energikilder som vind- og solkraft vil ha på kraftsystemet. Da Norge har en meget stor andel vannkraft er ikke dette årsaker til momentane frekvensavvik i det norske kraftsystem. Derfor ble anbefalingen til Statnett SF å sette i gang et kompetanseprosjekt på momentane frekvensavvik. Siden det ikke er funnet nok forskning på årsaker til momentane frekvensavvik, viser det at det er behov for mer kompetanse på dette området. Det er årsaken til at ingen forskningspartner er presentert da kunnskapen er for lite nasjonalt og internasjonalt.

## Referanser

- [1] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20,» p. 50.
- [2] North European Power Perspectives, «Reglering av kraftsystemet med ett stort innslag av variabel produksjon,» p. 9.
- [3] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20,» p. 17.
- [4] ENTSO-E, «AGREEMENT regarding operation of the interconnected Nordic power system (System Operation Agreement),» p. 31.
- [5] ENTSO-E, «ENTSO-E Member Companies,» [Internett]. Available: <https://www.entsoe.eu/about-entso-e/inside-entso-e/member-companies/Pages/default.aspx>. [Funnet 7 mars 2017].
- [6] Statnett SF, «Kraftsystem akkurat nå,» [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/kraftsystemet/>. [Funnet 7 mars 2017].
- [7] Katholieke Universiteit Leuven & Traactebel Engineering, «Study of the interactions and dependencies of Balancing Markets, intraday trade and automatically activated reserves,» p. 11 og 21.
- [8] Statnett SF, «Nettdrift er en balansekunst,» [Internett]. Available: <http://statnett.no/Samfunnsoppdrag/vart-samfunnsoppdrag/Nettdrift-er-en-balansekunst/>. [Funnet 7 mars 2017].
- [9] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20,» p. 8.
- [10] Statnett SF, «Kraftsystemet akkurat nå,» [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/>. [Funnet 7 mars 2017].
- [11] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Leveringskvalitet i kraftsystemet - Forslag til forskrift,» 2004, pp. 29-30.
- [12] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Driften av kraftsystemet 2013,» pp. 37-39.
- [13] EURELECTRIC & ENTSO-E, «Deterministic frequency deviations – root causes and proposals for potential solutions,» p. 9.
- [14] Statnett SF, «Halvårsrapport fra Landssentralen,» 1/2016, p. 11.
- [15] Statnett SF, «Statnett's System Operations and Market Development Plan 2014-20,» pp. 12-13.
- [16] EURELECTRIC & ENTSO-E, «Deterministic frequency deviations – root causes and proposals for potential solutions,» p. 8.
- [17] Statnett SF, Svenska Kraftnät, Energinet.dk og Fingrid Oyj, «Challenges and Opportunities for the Nordic Power System,» p. 2.

- [18] ENSTO-E, «Who Is ENTSO-E?», [Internett]. Available: <https://www.entsoe.eu/about-entsoe/Pages/default.aspx>. [Funnet 7 mars 2017].
- [19] ENSTO-E, «Network Code Overview», [Internett]. Available: <https://www.entsoe.eu/major-projects/network-code-development/Pages/default.aspx>. [Funnet 7 mars 2017].
- [20] STORE NORSKE LEKSIKON, «overføringsnett», [Internett]. Available: <https://snl.no/overf%C3%B8ringsnett>. [Funnet 20 September 2017].
- [21] Statnett SF, «Statnett's System Operations and Market Development Plan 2014-20», p. 30.
- [22] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20», p. 48.
- [23] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20», pp. 11-12.
- [24] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Systemansvar», [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/systemansvar/>. [Funnet 3 Mai 2017].
- [25] Statnett SF, «Om regulerkraftmarkedet (RK)», [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Markedsinformasjon/RKOM1/Om-regulerkraftmarkedet-RKM/>. [Funnet 03 Mai 2017].
- [26] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20», p. 23.
- [27] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20», p. 73.
- [28] Comsys AB, «Power Quality», [Internett]. Available: <https://adfpowertuning.com/technology/power-quality.html>. [Funnet 24 September 2017].
- [29] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Spenningskvalitet», 23 juli 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/nettjenester/leveringskvalitet/spenningskvalitet/>. [Funnet 24 september 2017].
- [30] Siemens, «Phasor Measurement Unit (PMU) and Grid Monitoring», [Internett]. Available: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/protection/pmu-phasor-measurment-unit/pages/pmu-phasor-measurement-unit.aspx>. [Funnet 24 September 2017].
- [31] johnzacruba, «Grid Frequency and Speed - Effects on Power Generation», 18 Oktober 2009. [Internett]. Available: <http://www.brighthubengineering.com/power-plants/45640-grid-frequency-and-speed-effects-on-power-generation/>. [Funnet 24 September 2017].
- [32] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Driften av kraftsystemet 2013», pp. v-vi.
- [33] Statnett SF, «Automatisk frekvensregulering i det nordiske kraftnettet», p. 24.
- [34] Ø. K. Rue, Forfatter, *Smarte Nett*. [Performance]. Statnett SF, 2017.
- [35] Statnett SF, «Rapport fra Systemansvarlig Om kraftsystemet i Norge 2015», p. 41.

- [36] I. Norheim, O. Mogstad, P. Sørensen, C. Jauch, D. Pudjianto og O. Anaya-Lara, «GUIDING A LEAST COST GRID INTEGRATION OF RES-ELECTRICITY IN AN EXTENDED EUROPE,» p. 7.
- [37] Y. Coughlan, «What are the required rate of change of frequency (ROCOF) standards for wind farms in the Irish Grid Code? In addition to generator inertia what are the main influences on the rate of change of frequency?,» p. 1.
- [38] Electrical Concepts, «Principle of df/dt Relay,» [Internett]. Available: <http://electricalbaba.com/rate-change-frequency-rocof-relay/>. [Funnet 4 Mai 2017].
- [39] nationalgrid, «Grid Code Frequency Response Working Group Antony Johnson – System Technical Performance,» p. 11.
- [40] A. Barman, «Modelling of Synthetic Inertia In Simpow,» p. 19.
- [41] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20,» p. 22.
- [42] Olje- og energidepartementet, «Fakta 2008 om energi og vannressurser i Norge, kapittel 7. Kraftmarked,» 2008, p. 90.
- [43] Nord Pool, «Trading,» [Internett]. Available: <http://www.nordpoolspot.com/TAS/>. [Funnet 03 Mai 2017].
- [44] Statnett SF, «Tertiærreserve (FRR-M),» [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Markedsinformasjon/RKOM1/>. [Funnet 28 September 2016].
- [45] Statnett SF, «Om regulerkraftopsjoner (RKOM),» [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Markedsinformasjon/RKOM1/Om-RKOM/>. [Funnet 03 Mai 2017].
- [46] Olje- og energidepartementet, «Fakta 2008 om energi og vannressurser i Norge, kapittel 7. Kraftmarked,» 2008, p. 91.
- [47] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20,» pp. 18-19.
- [48] Statnett SF, «Elspot,» [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/en/Market-and-operations/Market-information/Market-functions/Elspot/>. [Funnet 03 Mai 2017].
- [49] F. Holand, «Fremtidens frekvensstabilitet i kraftsystemet - roterende reserver, primærreserver og ny uregulerbar kraft i synkronområdet Norden i 2020,» 2014, p. 29.
- [50] Statnett SF, «Primærreserver (FCR),» [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Markedsinformasjon/Primærreserver/>. [Funnet 28 September 2016].
- [51] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20,» pp. 15-16.
- [52] F. Holand, «Fremtidens frekvensstabilitet i kraftsystemet - roterende reserver, primærreserver og ny uregulerbar kraft i synkronområdet Norden i 2020,» 2014, p. 30.

- [53] Statnett SF, «Sekundærreserver (aFRR),» [Internett]. Available: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Markedsinformasjon/sekundarreserver/>. [Funnet 28 September 2016].
- [54] Statnett SF, «Om reservemarkeder,» [Internett]. Available: <http://statnett.no/Kraftsystemet/Markedsinformasjon/>. [Funnet 28 September 2016].
- [55] Energifakta Norge, «FORSYNINGSSIKKERHET,» [Internett]. Available: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/forsyningssikkerhet/>. [Funnet 28 September 2017].
- [56] EURELECTRIC & ENTSO-E, «Deterministic frequency deviations – root causes and proposals for potential solutions,» pp. 13-14.
- [57] Statnett SF, «Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2014-20,» p. 42.
- [58] I. Norheim, O. Mogstad, P. Sørensen, C. Jauch, D. Pudjianto og O. Anaya-Lara, «GUIDING A LEAST COST GRID INTEGRATION OF RES-ELECTRICITY IN AN EXTENDED EUROPE,» p. 4.

## Vedlegg 1

### Alle artikler analysert

Frequency quality				
<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
Regulation quality for frequency response of turbine regulating system of isolated hydroelectric power plant with surge tank	Wuhan University, Uppsala University	Hydroelectric power plant, Surge tank, Isolate operation, Turbine regulating system, Frequency response, Regulation quality	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515002483">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515002483</a>	
Non-asymptotic model quality assessment of transfer functions at multiple frequency points	Korea Aerospace University, The University of Melbourne, University of Brescia	System identification, Frequency response, Confidence regions, Model quality, Finite sample properties	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109815002757#!">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109815002757#!</a>	
Power system frequency estimation using a least mean squares differentiator	University of Porto	Frequency estimation, Least squares methods, Power converter, Power quality	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516315587">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516315587</a>	
Performance of industrial melting pots in the provision of dynamic frequency response in the Great Britain power system	Cardiff University, Open Energi, National Grid, WH Power System Consultant Ltd	Demand response, Distributed control, Dynamic demand, Frequency response, Smart grids	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916317755#!">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916317755#!</a>	

Stochastic modelling of aggregated thermal loads for impact analysis of demand side frequency regulation in the case of Sardinia in 2020	Università degli Studi di Genova, Ricerca sul Sistema Energetico	Demand response, Thermostatically controlled loads, Frequency control, Power system modelling	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516327430#!">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516327430#!</a>	
<b>SINTEF</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/sponset av</b>
Frequency Quality in the Nordic Power System: Wind Variability, Hydro Power Pump Storage and Usage of HVDC Links	SINTEF	Offshore wind variability, hydro power flexibility, balancing power, frequency quality, pump storage, HVDC links, LFC	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1046640">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1046640</a>	
Applying power quality characteristic of wind turbines for assessing impact on voltage quality	SINTEF	wind turbines, grid connection, power quality, frequency, slow voltagevariations, flicker, voltage dips, harmonics	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S5915">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S5915</a>	
<b>IEEE</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/sponset av</b>



Evaluation of different strategies for frequency quality control	KTH Royal Institute of Technology, Svenska kraftnät	HVDC Ramping Rate, Wind power production, frequency quality, frequency control, primary frequency control, Variable Generation (VG)	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7516530/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7516530/</a>	
A prediction method for power frequency quality based on Bayesian theorem and uncertainty classification	Michigan Technological University	Bayes methods, Uncertainty, Measurement uncertainty, Phasor measurement units, Standards, Frequency measurement, Prediction methods	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/6804564/keywords?ctx=keywords">http://ieeexplore.ieee.org/document/6804564/keywords?ctx=keywords</a>	
Evaluating frequency quality of Nordic system using PMU data	Technical University of Denmark, Ea Energianalyse A/S	Demand as frequency controlled reserve, Frequency quality, Phasor Measurement Unit	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/4596468/">http://ieeexplore.ieee.org/document/4596468/</a>	
DSM based frequency quality control of power system	Harbin Institute of Technology, North China Electric Power University	power system, demand side management (DSM), direct load control (DLC), frequency quality	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/4523771/">http://ieeexplore.ieee.org/document/4523771/</a>	

Research on Coordinated Control Strategy for Improving the Frequency and Voltage Quality of Power System Based on Adaptive Fuzzy Control Using Wind Power and Energy Storage	The Chinese Academy of Sciences	Wind power, Energy storage, adaptive control, fuzzy control, coordinated control	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7926864/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7926864/</a>	
<b>Frequency deviation</b>				
<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
Spectral correction-based method for interharmonics analysis of power signals with fundamental frequency deviation	TUBITAK UZAY	Harmonic, Interharmonic, Frequency deviation, Spectral correction, Power quality (PQ), FFT	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779609000054">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779609000054</a>	
Frequency deviation control by coordination control of FC and double-layer capacitor in an autonomous hybrid renewable energy power generation system	Shiraz University of Technology	Wind turbine generator (WTG), Double-layer capacitor (DLC), Fuel cell (FC), Photovoltaic (PV), Frequency control	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110005665">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110005665</a>	
An integrated control method for a wind farm to reduce frequency deviations in a small power system	University of the Ryukyus	Frequency control, Load estimation, Pitch angle control, Wind farm, Wind speed prediction	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910003892">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910003892</a>	
A novel control approach for virtual synchronous generators to suppress frequency and voltage	Kawasaki Technology Co. Ltd, Kawasaki Heavy Industries Ltd, University of Kurdistan, Osaka University	Distributed generator, Frequency/voltage deviation, Inverter control, Microgrid, Synchronous analysis	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917308097#f0040">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917308097#f0040</a>	

fluctuations in microgrids				
Interharmonics analysis of power signals with fundamental frequency deviation using Kalman filtering	TUBITAK UZAY, Middle East Technical University	Harmonics, Interharmonics, Frequency deviation, Kalman filter (KF), Power quality (PQ), Electric arc furnace (EAF)	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779610000659">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779610000659</a>	
An analytical approach for removal of decaying DC component considering frequency deviation	Amirkabir University of Technology	Protective relaying, Phasor estimation, Decaying DC, Hilbert transform, Discrete Fourier transform, Frequency fluctuation	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779615002771">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779615002771</a>	
<b>SINTEF</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/spons et av</b>
A robust approach for system identification in the frequency domain	SINTEF, University of Toronto	Frequency domain fitting, multivariable system, Frequency domain fitting, multivariable system, rational approximation, state equation, system identification	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S5941">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S5941</a>	
Validation of frequency-dependent transmission line models	SINTEF	Electromagnetic transients, high-speed interconnects, power systems, transmission line modeling,	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S5962">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S5962</a>	
Parameter estimation from frequency response measurements	SINTEF, Universitat Politècnica de Catalunya	Modeling, Power System Transients, Frequency Response, Synchronous Machines, Transformers	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S14132">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S14132</a>	
<b>IEEE</b>				

Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/index terms	Kilde	Skrevet for/sponset av
Coordinated Control Algorithm for Distributed Battery Energy Storage Systems for Mitigating Voltage and Frequency Deviations	Sungkyunkwan University	Battery energy storage system (BESS), coordinated control, frequency deviation, load factor, voltage deviation	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7115169/keywords">http://ieeexplore.ieee.org/document/7115169/keywords</a>	Human Resources Development program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation, Korea government Ministry of Trade, Industry, and Energy
Controlling of frequency deviations in interconnected power systems using smart techniques	Amity University	Power Modulation Controller (PMC), High Voltage Direct Current (HVDC) Link, Frequency Oscillations, Automatic Generation Control (AGC), Smart Techniques, Power Modulation, Controllers, Power Modulation, Integrated Power Systems, Regulatory Expert Fuzzy System (REFS), Area Control Error (ACE)	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7853222/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7853222/</a>	
Algorithm for measuring amplitude and frequency deviations intended for PMU	Centro Nacional de Metrología	Power quality, Amplitude modulation, Frequency modulation, Measurement, Measurement techniques	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7540659/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7540659/</a>	
Frequency deviation control of a thermal and hydro area connected system	National Institute of Technology Meghalaya, Siliguri Institute of Technology	Controller, Bacterial foraging optimization technique, PID Controller, Thermal power plants, Hydro power plant	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7513295/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7513295/</a>	

A Modified Dynamic Synchronphasor Estimation Algorithm Considering Frequency Deviation	Jiaotong University	Frequency deviation, frequency estimation, dynamic phasor estimation, STFT, Taylor series	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7543499/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7543499/</a>	National Science Fund for Distinguished Young Scholars, National Natural Science Foundation of China, Fundamental Research Funds for the Central Universities
Low-voltage ride-through analysis of permanent magnet synchronous wind generator with harmonic distortion and frequency deviation using resonant controllers	Federal University of Minas Gerais, Federal University of Itajubá	resonant controllers, harmonic distortion, voltage sag, wind energy conversion system	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7972539/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7972539/</a>	
Method of estimating the maximum penetration level of wind power using transient frequency deviation index based on COI frequency	University Putra Malaysia	penetration of wind power, frequency deviation, center of inertia frequency, frequency trajectory	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7951572/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7951572/</a>	
<b>Deterministic frequency deviations</b>				
<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/spons et av</b>
Blackouts risk evaluation by Monte Carlo Simulation regarding cascading outages and system frequency deviation	École Polytechnique Fédérale de Lausanne	Monte Carlo Simulation, Gaussian Mixture Method, DC OPF, Cascading outages, Power law distribution	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612000727">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612000727</a>	

Deep belief network based deterministic and probabilistic wind speed forecasting approach	Shenzhen University	Deep belief network, Wind speed forecast, Deep learning, Quantile regression, Wavelet transform	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916312053">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916312053</a>	
The role of coordinated load shifting and frequency-based pricing strategies in maximizing hybrid system profit	Sahand University of Technology	Day-ahead load shifting, Maximum utilization of renewable sources, Maximizing hybrid system profit, Stochastic optimization, Frequency-based pricing, Pumped storage hydro unit	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217311490">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217311490</a>	
Providing frequency regulation reserve services using demand response scheduling	University of Hawai'i Manoa	Battery energy storage system, Water heater scheduling, Dynamic programming (DP), Demand response (DR), Frequency regulating reserve	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416306276">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416306276</a>	
Impact of energy storage units on load frequency control of deregulated power systems	Annamalai University	Artificial Cooperative Search algorithm, Deregulated power systems, Energy storage unit, Load frequency control, Superconducting Magnetic Energy Storage, Redox Flow Batteries	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215017661">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215017661</a>	
Scenario-based stochastic optimal operation of wind, photovoltaic, pump-storage hybrid system in frequency-based pricing	Sahand University of Technology	Two-stage objective function, Stochastic optimization, Frequency based pricing, Optimal hourly contract, Pumped storage hydro unit	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041500816X">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041500816X</a>	

A new tool to estimate maximum wind power penetration level: In perspective of frequency response adequacy	University of Queensland	Maximum wind penetration level, Frequency response of wind farm, Power system security	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915005486">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915005486</a>	
<b>SINTEF</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
Grid integration of big photovoltaic farms with energy storage support	SINTEF	PV Grid Codes, Frequency respons, Ramping, Storage	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1242490">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1242490</a>	
Design, tuning and testing of a flexible PLL for grid synchronization of three-phase power converters	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskap elige universitet	Estimation technique, FPGA, Phase-Locked Loop, Real time processing, Tuning	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S14241">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S14241</a>	
Improving the network infeed accuracy of non-dispatchable generators with energy storage devices	SINTEF, ETH Zurich	Energy storage, Wind turbines, Photovoltaic systems, Reliability	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S7857">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S7857</a>	
Simulations of wind power integration with complementary power system planning tools	SINTEF, Risø National Laboratory	Wind power, Power system planning, Market, Secondary control	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S4464">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S4464</a>	
Coordinated Control between Wind and Hydro Power Systems through HVDC Links	SINTEF	Storm control, Balancing power, LFC, Reservation of capacity on HVDCs, Offshore wind	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+938828">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+938828</a>	
<b>IEEE</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
An MPC strategy for automatic generation control with consideration of deterministic power imbalances	Swissgrid	Power system dynamics, Automatic generation control, Frequency control, Predictive models, Mathematical	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/6629359/">http://ieeexplore.ieee.org/document/6629359/</a>	

		model, Load modeling		
Demand-side contribution to secondary frequency control in an isolated wind-aluminum system	CPI Mengdong Energy Group Co., Ltd, North China Electric Power University	isolated power system, Aluminum smelter loads (ASLs), wind penetrations, secondary frequency control (SFC), demand side management (DSM)	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7446628/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7446628/</a>	
A Method for Sizing Energy Storage System to Increase Wind Penetration as Limited by Grid Frequency Deviations	Chinese Academy of Sciences, North China Electric Power University	Energy storage system, Fourier transform (FT), frequency deviation, power spectrum density (PSD), stochastic process, wind penetration limit, wind power	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7038229/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7038229/</a>	IEEE Power & Energy Society
Method for Assessing Grid Frequency Deviation Due to Wind Power Fluctuation Based on "Time-Frequency Transformation "	Tsinghua University, Risø National Laboratory	wind power fluctuation, Fourier transform (FT), frequency deviation, power spectrum density (PSD), Wiener-Khinchin theorem	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/5959228/">http://ieeexplore.ieee.org/document/5959228/</a>	
Frequency deviations and generation scheduling in the nordic system	Lund University, Technical university of denmark	Phasor Measurement Unit (PMU), Frequency Deviations, Frequency Variations, Hourly Scheduled Generation, Island Operation	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/6019176/">http://ieeexplore.ieee.org/document/6019176/</a>	
<b>Structural imbalances power grid</b>				



<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/ind ex terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/spons et av</b>
Impact of operation strategies of large scale battery systems on distribution grid planning in Germany	Reiner Lemoine Institut, Universitat Politècnica de Catalunya	Grid planning, Distribution grid, Large scale batteries, Community storage, Primary frequency control	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117302976">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117302976</a>	
Improvement of grid frequency dynamic characteristic with novel wind turbine based on electromagnetic coupler	Qingdao University, ETH Zürich, Tsinghua University, Technical University of Denmark	Wind power, Synchronous generator, Wind turbine, Electromagnetic coupler, Frequency response	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117305438">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117305438</a>	
An entropy-based metric to quantify the robustness of power grids against cascading failures	Delft University of Technology, Netherlands Organisation for applied scientific research	Cascading failures, Robustness, Complex networks, Power grid, Entropy, Metric	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753513001215">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753513001215</a>	
Active power control design for supporting grid frequency regulation in wind farms	Concordia University	Active power control, Adaptive control, Fault tolerance, Frequency control, Wind farm	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578815000401">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578815000401</a>	
A comprehensive review of synchronization methods for grid-connected converters of renewable energy source	University of Malaya, Universiti Malaysia Pahang, Universiti Malaysia Sarawak	Grid synchronization, Grid-connected converter, Phase angle estimation, Frequency estimation, Phase-locked loop	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000964">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000964</a>	
<b>SINTEF</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/ind ex terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/spons et av</b>
A framework to determine optimal offshore grid structures for wind power integration and power exchange	SINTEF	Transmission expansion planning, wind energy, mixed integer, linear programming, offshore grid	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S19091">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S19091</a>	

Balancing Energy Market Integration Considering Grid Constraints	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	PTDF, Balancing market integration, DCOFP, FBMC, Imbalance netting, IEEE 30-bus test system	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1285932">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1285932</a>	
<b>IEEE</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/sponset av</b>
Improved inertial control for permanent magnet synchronous generator wind turbine generators	University of Denver, Chonbuk National University, National Renewable Energy Laboratory	maximum power point tracking, Inertial response, permanent magnet synchronous generator wind turbine, FAST model, frequency regulation	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7580554/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7580554/</a>	<a href="#">Institution of Engineering and Technology</a>
Dynamic dimensioning of balancing reserve	RWTH Aachen University,	Balancing Energy, Reserve Capacity, International Grid Control Cooperation, Load-Frequency-Control	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7981896/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7981896/</a>	
Indian electricity grids: A decade of reformation and roadmap ahead	Power System Operation Corporation Limited	smart grid, Ancillary services, congestion management, imbalance pricing, transmission pricing, competitive bidding, market mechanism, renewable energy certificates, power exchange (PX)	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/6039584/">http://ieeexplore.ieee.org/document/6039584/</a>	
<b>Stochastic imbalances power grid</b>				
<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				

Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
An approach for efficient assessment of the performance of double auction competitive power market under variable imbalance cost due to high uncertain wind penetration	National Institute of Technology Silchar	Competitive power market, Imbalance cost, Forecasted wind speed, Actual wind speed, Power pool, Locational marginal pricing	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117301477">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117301477</a>	
A stochastic model for energy resources management considering demand response in smart grids	Research Group on Intelligent Engineering and Computing for Advanced Innovation and Development	Demand response, Electric vehicles, Energy resource scheduling, Smart grid, Stochastic programming, Uncertainty	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616304631">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616304631</a>	
Active power filter (APF) for mitigation of power quality issues in grid integration of wind and photovoltaic energy conversion system	University of Malaya, Deakin University	Active filter, Power quality, Grid-connected system, Transformerless inverter, Renewable energy integration, Reduced-switch-count inverter	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304267">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304267</a>	
<b>SINTEF</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
Value of combining hydrogen production with wind power in short-term electricity markets	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Statnett SF	Wind power, Hydrogen, Stochastic optimization	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S11437">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S11437</a>	
Onshore and Offshore Transmission Expansion in the European Grid for Large Scale Wind Integration in the North Sea	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Offshore wind, hydro power, renewable energy, transmission expansion planning, electrical infrastructure, mixed integer algorithm, investment costs, stochastic dynamic programming.	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+951600">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+951600</a>	

Laboratory demonstration of inertial response from VSC-HVDC connected wind farms	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	wind farm, Primary control, inertial response, HVDC, VSC	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1245522">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1245522</a>	
<b>IEEE</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/index terms	Kilde	Skrevet for/sponset av
A Flexible Stochastic Optimization Method for Wind Power Balancing With PHEVs	ELECTA, VITO	Demand side management, electric vehicles, Markov decision process, stochastic optimal control, wind balancing	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/6800157/">http://ieeexplore.ieee.org/document/6800157/</a>	
Fuzzy gain scheduled load frequency controller in presence of grid code frequency responsive wind power penetration	Deakin University, RMIT University	Frequency responsive wind plant, Fuzzy Logic, Gain Scheduling, Load frequency controller	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7749366/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7749366/</a>	
<b>15 minutes market frequency</b>				
<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/index terms	Kilde	Skrevet for/sponset av
The potential of grid-orientated distributed cogeneration on the minutes reserve market and how changing the operating mode impacts on CO2 emissions	Wuppertal Institute	Distributed cogeneration, CHP (combined heat and power), CO2 emissions, Minutes reserve market, Balancing power, Grid-orientated operation mode	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216301700">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216301700</a>	

Barriers to entry in frequency-regulation services markets: Review of the status quo and options for improvements	Génie électrique et électronique de Paris, Helmholtz Centre for Environmental Research, University of Paris-Sud, CentraleSupélec	Market design, Frequency regulation services, Distributed energy resources	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312005">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312005</a>	
Econometric analysis of 15-minute intraday electricity prices	University of Duisburg-Essen, University of St. Gallen, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Intraday electricity prices, Bidding behavior, Renewable energies	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988317300683">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988317300683</a>	
Reforming minute reserve policy in Germany: A step towards efficient markets?	Vienna University of Economics and Business	Balancing power, Policy reform, Market efficiency	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509002171">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509002171</a>	
Methodology to analyze combined heat and power plant operation considering electricity reserve market opportunities	Lappeenranta University of Technology	Combined heat and power, Frequency containment, Electricity markets	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217305273">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217305273</a>	
An integrated pan-European ancillary services market for frequency control	ETH Zürich, Swissgrid	Ancillary services, Dimensioning, Pan-European electricity market	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513006733">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513006733</a>	
Frequency responsive services by wind generation resources in United States	Texas Tech University	Ancillary service markets, Emulated inertial response, Synchronous inertial response, Primary frequency response, Variable speed wind turbines, Reliability standard, Frequency responsive service	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115012630">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115012630</a>	
<b>IEEE</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/spons et av</b>

Stochastic programming for valuing energy storage providing primary frequency control	Université catholique de Louvain	Stochastic Programming, Energy storage, Frequency Containment Reserves, Grid-frequency modelling	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7513938/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7513938/</a>	
Structural imbalances in the Nordic power system — Causes, future expectations and remedies	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Statnett SF	ramping, Power system, imbalance	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/6861227/">http://ieeexplore.ieee.org/document/6861227/</a>	
Analysis of the minimum activation period of batteries in frequency containment reserve	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE	Battery Energy Storage Systems (BESS), Corrective Power, Frequency Containment Reserve, Minimum Activation Period, Power Reserve Markets	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7981904/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7981904/</a>	
<b>Inertia frequency deviation</b>				
<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/ind ex terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/spons et av</b>
A novel adaptive deadbeat-based control for load frequency control of low inertia system in interconnected zones north and south of Scotland	Cardiff University, Al-Mustansiriyah University, Iraq Ministry of Science and Technology	Adaptive Deadbeat (ADB), Load Frequency Control (LFC), Low inertia system, Multiarea system, Power system, Particle Swarm Optimization (PSO), Rate of Change of Frequency (RoCoF), Scotland zones, Smart grid	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151631626X">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151631626X</a>	

Comparison between synthetic inertia and fast frequency containment control based on single phase EVs in a microgrid	Technical University of Denmark	Electric vehicles, Experimental validation, Frequency containment control, Frequency stability, Synthetic inertia	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917308024">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917308024</a>	
Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review	University of Malaya	Deloading control, Energy storage system (ESS), Frequency regulation, Inertia, Load shedding, Over-speed control, Rate of change of frequency (ROCOF), Renewable energy source (RES)	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116309212">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116309212</a>	
Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept: An integrated demand response and droop controlled distributed generation framework	Iran University of Science and Technology	Microgrid energy management system, Droop control, Virtual inertia, Reserve scheduling, Demand response	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414010887">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414010887</a>	
<b>SINTEF</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/ind ex terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/spons et av</b>
Equivalence of Virtual Synchronous Machines and Frequency-Droops for Converter-Based MicroGrids	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	virtual synchronous machine, Droop control, power electronic converters	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1049603">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1049603</a>	
Virtual synchronous machine-based control of a single-phase bidirectional battery charger for providing vehicle-to-grid services	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Bidirectional battery charger, electric vehicle charging, vehicle-to-grid services, virtual synchronous machine	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1357789">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1357789</a>	

A synchronization controller for grid reconnection of islanded virtual synchronous machines	SINTEF	Virtual Synchronous Machine, Islanding Operation, Grid Synchronization, Power Electronic Converters	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1343772">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1343772</a>	
<b>IEEE</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
Enhancing power system frequency stability with synthetic inertia	Budapest University of Technology and Economics	Frequency control, Renewable energy sources, Power system stability, Synthetic inertia	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/8011254/">http://ieeexplore.ieee.org/document/8011254/</a>	
Analysis of Frequency Transients in Isolated Microgrids	Indian Institute of Technology Bombay	Microgrids, Damping, Transient analysis, Power system stability, Generators, Stability analysis	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/8022948/">http://ieeexplore.ieee.org/document/8022948/</a>	
Frequency evaluation of the Nordic power system using PMU measurements	Chalmers University of Technology	frequency response, phasor measurement, power markets, wind turbines	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/8025491/">http://ieeexplore.ieee.org/document/8025491/</a>	
<b>Imbalances caused by forecast errors</b>				
<b>Science direct (advance search med Energy og Engineering)</b>				
Artikkelnavn	Forfatter (institusjon)	Keywords/ind ex terms	Kilde	Skrevet for/spons et av
Early power to gas applications: Reducing wind farm forecast errors and providing secondary control reserve	Reiner Lemoine Institut, University of Wuppertal, Forschungszentrum Jülich, RWTH Aachen University	Power to gas, Fuel cell, Electrolyzer, Secondary control reserve, Forecast error	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309199">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309199</a>	



Optimal operation of a pumped-storage hydro plant that compensates the imbalances of a wind power producer	Carlos III University of Madrid	Wind power, Management of forecast errors, Pumping storage, Wind-hydro coordination, Wind power scenarios, Optimization	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779611000940">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779611000940</a>	
Benefits of solar forecasting for energy imbalance markets	University of California San Diego	Solar forecasting, Real-time market, Energy imbalance market, Reserves	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115302901">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115302901</a>	
<b>SINTEF</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/sponsert av</b>
A Multiscale Wind and Power Forecast System for Wind Farms	SINTEF, The Norwegian Meteorological Institute	Wind Energy, Power Forecasting, Multiscale Models	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1147371">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISTin+1147371</a>	
Alternative schemes for exchange of balancing resources between separate synchronous systems in Northern Europe	SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Balance Management, Exchange schemes, HVDC links, Power system optimisation	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+A21288">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+A21288</a>	The Norwegian Research Council
Method for assessing impact of large-scale wind power integration on reserves	SINTEF, Imperial College London	large-scale wind power integration, reserves, system frequency, UK system	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S4690">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=SINTEF+S4690</a>	
<b>IEEE</b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/sponsert av</b>
Adequacy of frequency reserves for high wind power generation	Technical University of Denmark, Energinet.dk	power generation economics, power system restoration, probability, wind power plants	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7984981/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7984981/</a>	
Load control for supply-demand balancing under Renewable Energy forecasting	Saarland University	DC Micro-grid, Demand side management, Support vector machine, Sliding mode control	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/8001071/">http://ieeexplore.ieee.org/document/8001071/</a>	

Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration	University of Manchester	wind power generation, Expected energy not served, mixed integer programming, Monte Carlo methods, power generation dispatch, power generation scheduling, spinning reserve, value of lost load	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/4682642/">http://ieeexplore.ieee.org/document/4682642/</a>	
Adequacy of operating reserves for power systems in future european wind power scenarios	Technical University of Denmark	variability, operating reserves, wind generation, ENTSO-E, forecast error	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7286548/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7286548/</a>	
<b><u>Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet</u></b> <b><u>Power System Publications</u></b>				
<b>Artikkelnavn</b>	<b>Forfatter (institusjon)</b>	<b>Keywords/index terms</b>	<b>Kilde</b>	<b>Skrevet for/sponset av</b>
Smoothing of Offshore Wind Power Variations with Norwegian Pumped Hydro: Case Study	University of Padova, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, SINTEF	pumped hydro, offshore wind, power fluctuations, reservoir optimization	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030477">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030477</a>	
Model Predictive Load-Frequency Control	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	model predictive control, Load frequency control	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/document/7065326/">http://ieeexplore.ieee.org/document/7065326/</a>	IEEE Power & Energy Society
Model predictive load-frequency control taking into account imbalance uncertainty	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Imperial College London	Model predictive control, Load frequency control, Robust control, Intermittent energy resources, Power system control	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066115300496">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066115300496</a>	
Balancing of Variable Wind and Solar Production in Continental Europe with Nordic Hydropower – A Review of	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Variability, Balancing power, Storage, Hydropower	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030519">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030519</a>	

Simulation Studies				
Economic Analysis of Large-Scale Pumped Storage Plants in Norway	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, SINTEF	Pumped storage plant, power system, renewable energy, energy storage, green battery	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030222">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030222</a>	
Joint Modelling of Wind Power and Hydro Inflow for Power System Scheduling	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, SINTEF	Forecasting, hydro inflow, power system scheduling, wind power, vector autoregressive model	<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030398">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215030398</a>	
A Virtual synchronous machine implementation for distributed control of power transformers in SmartGrids	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, SINTEF	Distributed generation, Energy conversion, Inertia emulation, Power electronic control, Small-signal stability, Virtual Synchronous Machine	<a href="https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRStin+1230063">https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRStin+1230063</a>	

## Vedlegg 2

Active filter  
Active power control  
Actual wind speed  
adaptive control  
Adaptive control  
Adaptive Deadbeat (ADB)  
Aluminum smelter loads (ASLs)  
Amplitude modulation  
Ancillary service markets  
Ancillary services  
Ancillary services  
Area Control Error (ACE)  
Artificial Cooperative Search algorithm  
Automatic generation control  
Automatic Generation Control (AGC)  
Bacterial foraging optimization technique  
Balance Management  
Balance Management  
Balancing Energy  
Balancing market integration  
balancing power  
Balancing power  
Balancing power  
Balancing power  
Balancing power  
Balancing power  
Battery energy storage system  
Battery energy storage system (BESS)  
Battery Energy Storage Systems (BESS)  
Bayes methods  
Bidding behavior  
Bidirectional battery charger  
Cascading failures  
Cascading outages  
center of inertia frequency  
CHP (combined heat and power)  
CO2 emissions  
Combined heat and power  
Community storage  
competitive bidding  
Competitive power market  
Complex networks  
Confidence regions  
congestion management  
Controller  
Controllers

coordinated control  
coordinated control  
Corrective Power  
Damping  
Day-ahead load shifting  
DC Micro-grid  
DC OPF  
DCOPF  
Decaying DC  
Deep belief network  
Deep learning  
Deloading control  
Demand as frequency controlled reserve  
Demand response  
Demand response  
Demand response  
Demand response  
Demand response (DR)  
Demand side management  
Demand side management  
demand side management (DSM)  
demand side management (DSM)  
Deregulated power systems  
Dimensioning  
direct load control (DLC)  
Discrete Fourier transform  
Distributed cogeneration  
Distributed control  
Distributed energy resources  
Distributed generation  
Distributed generator  
Distribution grid  
Double-layer capacitor (DLC)  
Droop control  
Droop control  
Dynamic demand  
dynamic phasor estimation  
Dynamic programming (DP)  
Electric arc furnace (EAF)  
electric vehicle charging  
Electric vehicles  
electric vehicles  
Electric vehicles  
electrical infrastructure  
Electricity markets  
Electrolyzer

Electromagnetic coupler  
Electromagnetic transients  
Emulated inertial response  
Energy conversion  
Energy imbalance market  
Energy resource scheduling  
Energy storage  
energy storage  
Energy storage  
Energy storage  
Energy storage  
Energy storage system  
Energy storage system (ESS)  
Energy storage unit  
Entropy  
ENTSO-E  
Estimation technique  
Exchange schemes  
Exchange schemes  
Expected energy not served  
Experimental validation  
FAST model  
Fault tolerance  
FBMC  
FFT  
Finite sample properties  
Forecast error  
forecast error  
Forecasted wind speed  
Forecasting  
Fourier transform (FT)  
Fourier transform (FT)  
FPGA  
Frequency based pricing  
Frequency containment  
Frequency containment control  
Frequency Containment Reserve  
Frequency Containment Reserves  
Frequency control  
frequency control  
Frequency control  
Frequency control  
Frequency control  
Frequency control  
Frequency control  
Frequency control  
Frequency control  
Frequency deviation  
Frequency deviation

Frequency deviation  
frequency deviation  
frequency deviation  
frequency deviation  
frequency deviation  
Frequency Deviations  
Frequency domain fitting  
Frequency domain fitting  
Frequency estimation  
frequency estimation  
Frequency estimation  
Frequency fluctuation  
Frequency measurement  
Frequency modulation  
Frequency Oscillations  
frequency quality  
frequency quality  
Frequency quality  
frequency quality  
Frequency regulating reserve  
frequency regulation  
Frequency regulation  
Frequency regulation services  
Frequency respons  
Frequency response  
Frequency response  
Frequency response  
Frequency Response  
Frequency response  
frequency response  
Frequency response of wind farm  
Frequency responsive service  
Frequency responsive wind plant  
Frequency stability  
frequency trajectory  
Frequency Variations  
Frequency/voltage deviation  
Frequency-based pricing  
Fuel cell  
Fuel cell (FC)  
fuzzy control  
Fuzzy Logic  
Gain Scheduling  
Gaussian Mixture Method  
Generators  
green battery

Grid planning  
Grid synchronization  
Grid Synchronization  
Grid-connected converter  
Grid-connected system  
Grid-frequency modelling  
Grid-orientated operation mode  
Harmonic  
harmonic distortion  
Harmonics  
High Voltage Direct Current (HVDC) Link  
high-speed interconnects  
Hilbert transform  
Hourly Scheduled Generation  
HVDC  
HVDC links  
HVDC links  
HVDC links  
HVDC Ramping Rate  
hydro inflow  
hydro power  
hydro power flexibility  
Hydro power plant  
Hydroelectric power plant  
Hydrogen  
Hydropower  
IEEE 30-bus test system  
imbalance  
Imbalance cost  
Imbalance netting  
imbalance pricing  
Inertia  
Inertia emulation  
Inertial response  
inertial response  
Integrated Power Systems  
Interharmonic  
Interharmonics  
Intermittent energy resources  
International Grid Control Cooperation  
Intraday electricity prices  
Inverter control  
investment costs  
Island Operation  
Islanding Operation  
Isolate operation



isolated power system  
Kalman filter (KF)  
Large scale batteries  
large-scale wind power integration  
Least squares methods  
LFC  
LFC  
linear programming  
Load estimation  
load factor  
Load frequency control  
Load frequency control  
Load frequency control  
Load Frequency Control (LFC)  
Load frequency controller  
Load modeling  
Load shedding  
Load-Frequency-Control  
Locational marginal pricing  
Low inertia system  
Management of forecast errors  
Market  
Market design  
Market efficiency  
market mechanism  
Markov decision process  
Mathematical model  
Maximizing hybrid system profit  
maximum power point tracking  
Maximum utilization of renewable sources  
Maximum wind penetration level  
Measurement  
Measurement techniques  
Measurement uncertainty  
Metric  
Microgrid  
Microgrid energy management system  
Microgrids  
Minimum Activation Period  
Minutes reserve market  
mixed integer  
mixed integer algorithm  
mixed integer programming  
model predictive control  
Model predictive control  
Modeling

Monte Carlo methods  
Monte Carlo Simulation  
Multiarea system  
Multiscale Models  
multivariable system  
multivariable system  
offshore grid  
offshore wind  
Offshore wind  
Offshore wind  
Offshore wind variability  
operating reserves  
Optimal hourly contract  
Optimization  
Over-speed control  
Pan-European electricity market  
Particle Swarm Optimization (PSO)  
penetration of wind power  
permanent magnet synchronous generator wind turbine  
Phase angle estimation  
Phase-Locked Loop  
Phase-locked loop  
Phasor estimation  
phasor measurement  
Phasor Measurement Unit  
Phasor Measurement Unit (PMU)  
Phasor measurement units  
Photovoltaic (PV)  
Photovoltaic systems  
PID Controller  
Pitch angle control  
Policy reform  
Power converter  
Power electronic control  
power electronic converters  
Power Electronic Converters  
power exchange (PX)  
power fluctuations  
Power Forecasting  
power generation dispatch  
power generation economics  
power generation scheduling  
Power grid  
Power law distribution  
power markets

Power Modulation  
Power Modulation  
Power Modulation Controller (PMC)  
Power pool  
Power quality  
Power quality  
Power quality  
Power quality (PQ)  
Power quality (PQ)  
Power Reserve Markets  
power spectrum density (PSD)  
power spectrum density (PSD)  
power system  
power system  
Power system  
Power system  
Power system control  
Power system dynamics  
Power system modelling  
Power system optimisation  
Power system optimisation  
Power system planning  
power system restoration  
power system scheduling  
Power system security  
Power system stability  
Power system stability  
Power System Transients  
power systems  
Power to gas  
Prediction methods  
Predictive models  
Primary control  
primary frequency control  
Primary frequency control  
Primary frequency response  
probability  
Protective relaying  
PTDF  
pump storage  
pumped hydro  
Pumped storage hydro unit  
Pumped storage hydro unit  
Pumped storage plant  
Pumping storage  
PV Grid Codes

Quantile regression  
Ramping  
ramping  
Rate of Change of Frequency (RoCoF)  
Rate of change of frequency (ROCOF)  
rational approximation  
Real time processing  
Real-time market  
Redox Flow Batteries  
Reduced-switch-count inverter  
Regulation quality  
Regulatory Expert Fuzzy System (REFS)  
Reliability  
Reliability standard  
Renewable energies  
renewable energy  
renewable energy  
renewable energy certificates  
Renewable energy integration  
Renewable energy source (RES)  
Renewable energy sources  
Reservation of capacity on HVDCs  
Reserve Capacity  
Reserve scheduling  
Reserves  
reserves  
reservoir optimization  
resonant controllers  
Robust control  
Robustness  
Scotland zones  
Secondary control  
Secondary control reserve  
secondary frequency control (SFC)  
Sliding mode control  
Small-signal stability  
smart grid  
Smart grid  
Smart grid  
Smart grids  
Smart Techniques  
Solar forecasting  
Spectral correction  
spinning reserve  
Stability analysis  
Standards

state equation  
STFT  
stochastic dynamic programming  
stochastic optimal control  
Stochastic optimization  
Stochastic optimization  
Stochastic optimization  
stochastic process  
Stochastic programming  
Stochastic Programming,  
Storage  
Storage  
Storm control  
Superconducting Magnetic Energy Storage  
Support vector machine  
Surge tank  
Synchronous analysis  
Synchronous generator  
Synchronous inertial response  
Synchronous Machines  
Synthetic inertia  
Synthetic inertia  
system frequency  
System identification  
system identification  
Taylor series  
Thermostatically controlled loads  
Transformerless inverter  
Transformers  
Transient analysis  
Transmission expansion planning  
transmission expansion planning  
transmission line modeling  
transmission pricing  
Tuning  
Turbine regulating system  
Two-stage objective function  
UK system  
Uncertainty  
Uncertainty  
value of lost load  
Variability  
variability  
Variable Generation (VG)  
Variable speed wind turbines  
vector autoregressive model

vehicle-to-grid services  
Virtual inertia  
Virtual Synchronous Machine  
virtual synchronous machine  
Virtual Synchronous Machine  
virtual synchronous machine  
voltage deviation  
voltage sag  
VSC  
Water heater scheduling  
Wavelet transform  
Wiener–Khinchin theorem  
wind balancing  
wind energy  
Wind Energy  
wind energy conversion system  
Wind farm  
Wind farm  
wind farm  
wind generation  
wind penetration limit  
wind penetrations  
Wind power  
wind power  
Wind power  
wind power  
Wind power  
Wind power  
Wind power  
wind power fluctuation  
wind power generation  
wind power plants  
Wind power production  
Wind power scenarios  
Wind speed forecast  
Wind speed prediction  
Wind turbine  
Wind turbine generator (WTG)  
Wind turbines  
wind turbines  
Wind-hydro coordination

### Vedlegg 3

#### Institusjoner i alfabetisk rekkefølge med antall publiseringer

Al-Mustansiriyah University  
Amirkabir University of Technology  
Amity University  
Annamalai University  
Budapest University of Technology and Economics  
Cardiff University x 2  
Carlos III University of Madrid  
CentraleSupélec  
Centro Nacional de Metrología  
Chalmers University of Technology  
Chinese Academy of Sciences  
Chonbuk National University  
Concordia University  
CPI Mengdong Energy Group Co. Ltd  
Deakin University x 2  
Swissgrid  
Delft University of Technology  
Ea Energianalyse A/S  
École Polytechnique Fédérale de Lausanne  
ELECTA  
Energinet.dk  
ETH Zurich x 3  
Federal University of Itajubá  
Federal University of Minas Gerais  
Forschungszentrum Jülich  
Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE  
Génie électrique et électronique de Paris  
Harbin Institute of Technology  
Helmholtz Centre for Environmental Research  
Imperial College London x 2  
Indian Institute of Technology Bombay  
Iran University of Science and Technology  
Iraq Ministry of Science and Technology  
Jiaotong University  
Kawasaki Heavy Industries Ltd  
Kawasaki Technology Co. Ltd  
Korea Aerospace University  
KTH Royal Institute of Technology  
Lappeenranta University of Technology  
Lund University  
Michigan Technological University  
Middle East Technical University  
National Grid

National Institute of Technology Meghalaya  
National Institute of Technology Silchar  
National Renewable Energy Laboratory  
Netherlands Organisation for applied scientific research  
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet x 17  
North China Electric Power University x 3  
Open Energi  
Osaka University  
Power System Operation Corporation Limited  
Qingdao University  
Reiner Lemoine Institut x 2  
Research Group on Intelligent Engineering and Computing for Advanced Innovation and Development  
Ricerca sul Sistema Energetico  
Risø National Laboratory x 2  
RMIT University  
RWTH Aachen University x 2  
Saarland University  
Sahand University of Technology x 2  
Shenzhen University  
Shiraz University of Technology  
Siliguri Institute of Technology  
SINTEF x 25  
Statnett SF x 2  
Sungkyunkwan University  
Svenska kraftnät  
Swissgrid  
Technical University of Denmark x 6  
Texas Tech University  
The Chinese Academy of Sciences  
The Norwegian Meteorological Institute  
The University of Melbourne  
Tsinghua University x 2  
TUBITAK UZAY x 2  
Università degli Studi di Genova  
Universitat Politècnica de Catalunya x 2  
Université catholique de Louvain  
Universiti Malaysia Pahang  
Universiti Malaysia Sarawak  
University of Brescia  
University of California San Diego  
University of Denver  
University of Duisburg-Essen  
University of Hawai'i Manoa  
University of Kurdistan  
University of Malaya x 3



University of Manchester  
University of Padova  
University of Paris-Sud  
University of Porto  
University of Queensland  
University of St. Gallen  
University of the Ryukyus  
University of Toronto  
University of Wuppertal  
University Putra Malaysia  
Uppsala University  
Vienna University of Economics and Business  
VITO  
WH Power System Consultant Ltd  
Wuhan University  
Wuppertal Institute



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway