

Frequency Containment Process - Oppsummering av ny FCR-spesifikasjon

Underlag for FCP Pilot

Mai 2021

Systemutvikling, GUS

FCR@statnett.no

Intro

Dette er en beskrivelse av kommende spesifikasjon for Frequency Containment Reserve [1], FCR, som er utviklet gjennom det felles nordiske FCP-prosjektet [2] [3] [4]. Hensikten med dokumentet er å gi en oppsummering av innholdet i de nye felles nordiske kravene til FCR på norsk, synliggjøre sammenheng med etablerte krav til frekvensregulering og vise koblingen til markedsløsningen. Dokumentet er ikke utfyllende, og er ikke en erstatning av kravdokumentene. Det henvises løpende til kravdokumentene.

Utviklingen er gjort innenfor rammene av EU-forordningen System Operations Guideline [5]. Begrepet 'krav' blir brukt gjennomgående, men deltagelse i FCR-markedene er frivillig, og følgelig er kravetterlevelse noe FCR-tilbydere selv velger å initiere. Kravene skal ikke forbindes med Nasjonal Veileder for Funksjonskrav [6].

Innhold

Intro.....	2
1 Bakgrunn	4
1.1 Generelt	4
1.2 Utvikling	5
2 Tekniske krav for FCR-leveranse	7
2.2 FCR-D.....	10
2.3 Samtidig leveranse av FCR-N og -D	12
2.4 Målinger	12
2.5 Sanntidsdatautveksling	13
2.6 Datalogging	13
3 Krav til testing av FCR-leveranse.....	14
3.1 Generelt	14
3.2 Lastpunkter	14
3.3 FCR-N Tester	15
3.4 FCR-D Tester.....	16
3.5 Andre tester	17
4 Evaluering av kravetterlevelse	18
4.1 Utledning av transferfunksjonen for FCR enheten fra tester	18
4.2 Evalueringer ved felles vannvei	21
5 Søknadsprosess	22
6 Operasjonelt.....	22
7 Markedsløsning.....	22
8 Bibliografi	23
9 Vedlegg A - Modellering – Klassisk modell vs. Nordisk FCR-modell	24
10 Vedlegg B – Notasjoner og benevninger.....	26

1 Bakgrunn

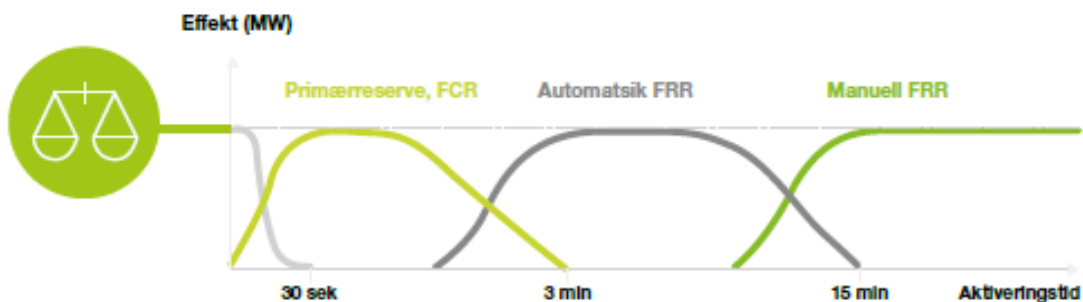
1.1 Generelt

System- og markedsutviklingsplan [7]

Vilkår for tilbud, aksept, rapportering og avregning i marked for FCR [8]

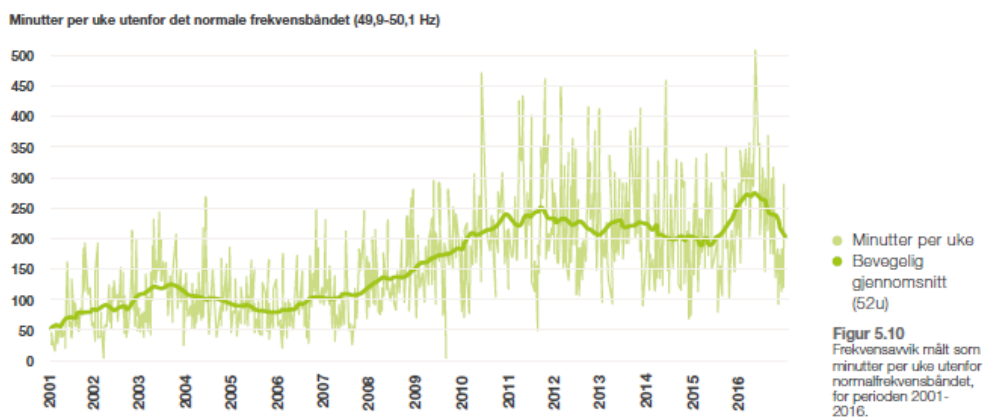
Frequency Containment Reserves (FCR) er:

- Førstelinjeforsvaret for balansering av effektbalansen av systemet
- Skal begrense frekvensavviket før andre tregere reserver gjenoppretter 50 Hz, vist i Figur 1-1
- Lokal kontroll av aktiv effekt i kraftverk



Figur 1-1: Sammenhengen mellom respons og aktiveringstid på de tre typene reserver som benyttes i dag når en ubalanse i systemet inntreffer. Den grå linjen illustrer kraftsystemets naturlige treghetsmoment (inertia) som bidrar med frekvensregulering [7].

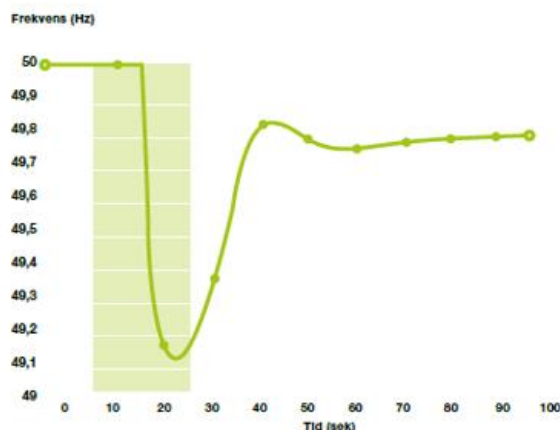
Frequency Containment Reserve – Normal, FCR-N/FNR, er normaldriftsreserven. Den håndterer normale variasjoner i systemet som følger av den uunngåelige forskjellen mellom planlagt produksjon og faktisk forbruk. Volum og varigheten til FCR-N bestemmes av aFRR og mFRR. Sammen med aFRR og mFRR søkes det å oppnå en frekvenskvalitet, hvor avvik fra normaldriftsbåndet (49,9-50,1 Hz) begrenses til mindre enn 10 000 minutter.



Figur 1-2: Utvikling i frekvenskvalitet i det nordiske synkronområdet [7].

Frequency Containment Reserve – Disturbed, FCR-D/FDR, er driftsforstyrrelsesreserven. Den håndterer referansehendelsen i systemet (dimensjonerende utfall) uten momentan frekvens i systemet under 49 Hz og over 51 Hz ved utfall av henholdsvis dimensjonerende

produksjon/importerende kabel og forbruk/eksporterende kabel. Ny stabil frekvens skal være høyere enn 49,5 Hz og lavere enn 50,5 Hz for de samme hendelsene.



Figur 1-3: Illustrasjon av frekvensforløpet som følger av en referansehendelse - utfall av største produksjonsenhet [7].

1.2 Utvikling

Ny strategi for FCR skal (SMUP [7], side 62-63):

- Bedre frekvenskvaliteten
- Hindre overleveranse
- Legge til rette for effektive markeder

Felles nordisk design av FCR tar utgangspunkt i:

- Krav til frekvenskvalitet
- Lavere inertia
- Dimensjonerende utfall
- Ubalanseprofiler
- Tekniske muligheter i eksisterende anlegg
- Behov for prekvalifisering

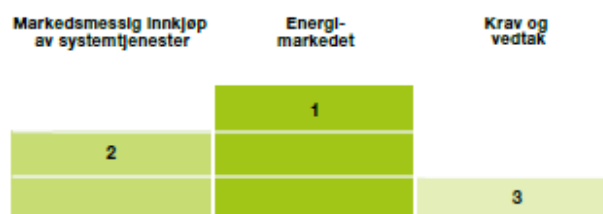
Norsk strategi inkluderer i tillegg:

- Avvikling av grunnleveranse - Vedtak om leveranse av systemtjenester
- Bruk av nasjonale markeder for FCR-N og -D
- Separatdriftsdeteksjon

Hovedmomenter fra SMUP [7] vedr. FCR utvikling:

Store produksjonsenheter med vannkraft i Norge og kjernekraft i Sverige og Finland er hovedleverandør av stabilitetsegenskaper til kraftsystemet, som spenningsregulering, FCR og inertia. Driftssituasjoner der en stor andel av produksjonen skjer fra mindre, uregulerbare enheter som smakraft og vindkraft, utfordrer evnen til å stabilisere systemet i feilsituasjoner.

Oscillasjoner (pendlinger) i frekvensen med periode 60-90 sekunder i det nordiske synkronsystemet bidrar til svekket frekvenskvalitet.



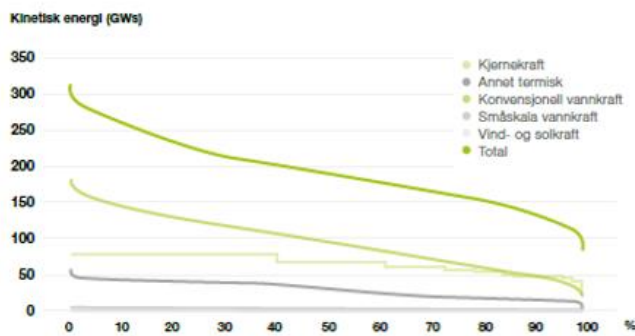
Figur 1-4: Illustrasjon av systemansvarliges foretrukne virkemidler [7].

Gjennom det nordiske samarbeidet er det avdekket utfordringer når det gjelder å definere en optimal spesifisering for primærreserve (FCR), som møter behovet i Norden med å sikre god frekvenskvalitet og håndterer lav inertia.

En avdekket utfordring er den såkalte mekaniske slarken i vannkraftanlegg, som delvis begrenser vannkraftens mulighet for å bidra med en presis regulering i normaldrift. (...) På systemnivå gir dette seg uttrykk i uheldige oscillasjoner ("60s oscillasjoner") eller svingninger, som forverrer frekvenskvaliteten og gir mindre stabilitetsmarginer.

En annen problemstilling handler om tilstrekkelig rask responstid ved dimensjonerende hendelser. (...) De norske stabilitetskravene har derfor medført at vi ikke alltid har møtt de nordiske spesifisasjonene til responstid for å håndtere ubalanser i det nordiske systemet.

Det er behov for nye spesifikasjoner for FCR som mer effektivt enn i dag håndterer ubalanser i systemet og reduserer oscillasjonene i frekvensen, samt også i størst mulig utstrekning bidrar til stabilitet i systemet. Gjennom tilpasning av gjeldende spesifikasjoner for håndtering av overgang til separatudrift må det legges til grunn at frekvensreguleringen tilpasses felles nordiske spesifikasjoner, samtidig som separatudriftsbehov i Norge ivaretas.



Figur 1-5: Varighetskurver for ulike typer produksjon sitt bidrag til inertia i kraftsystemet [7]

2 Tekniske krav for FCR-leveranse

Tekniske krav til FCR-leveransen er designet ut ifra systemets behov, definert ved frekvensmåltallene i kapittel 1.1. Kravene til hver enkelt FCR-enhet følger prinsippet om at systemets behov skal være møtt, dersom all FCR hadde like egenskaper som den enkelte enheten [3] [2].

Sammenlignet med evaluering av frekvensreguleringsevne i separatudrift, vil systemet ha en annen, og høyere, aksellerasjonstid/tregghetsmoment/inertia. Egenskapene i separatudrift er ikke lenger kravstilt i markedskravene. Eventuelle krav til separatudriftsegenskaper stilles i nasjonale funksjonskrav, inkludert deteksjon og parameterskifter for å regulere i separatudrift (FCR-I).

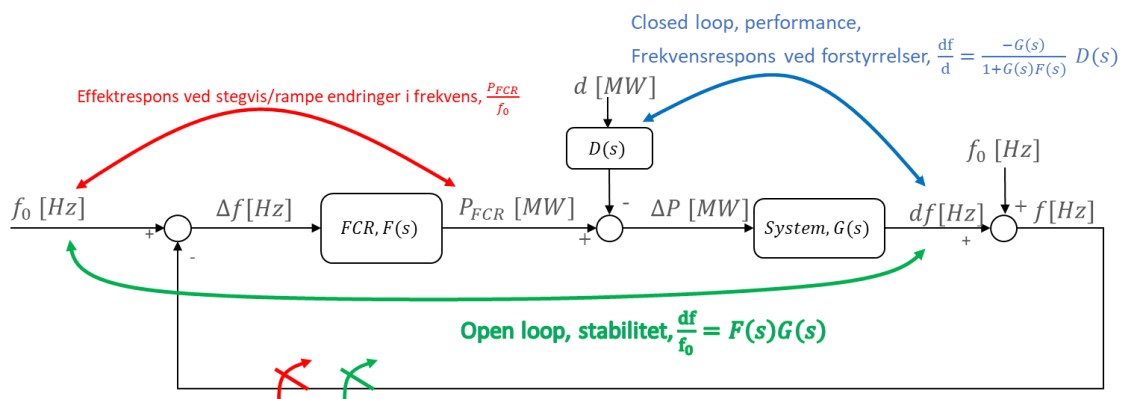
En FCR-enhet er en eller flere produksjons- eller forbruksenheter som samlet oppfyller de tekniske kravene for FCR-leveranse. Vannkraftverk med felles vannvei evalueres som én FCR-enhet.

FCR-responsen skal oppfylle krav for steg-/ramperesponser og i frekvensplanet. Frekvensplanresponsen evalueres i et system slik det er modellert i Figur 2-1. Se Vedlegg A for detaljer og sammenheng med evaluering av separatudriftsegenskaper.

I Figur 2-1 er $F(s)$ er FCR-enheten, $G(s)$ er modellen av systemet og d er ubalansene som sammen med funksjonen $D(s)$ beskriver den dimensjonerende forstyrrelsesprofilen (ubalanseprofilen) for FCR-N. Modellen er skalert slik at 1 pu frekvensavvik, $df = 0.1 \text{ Hz} / 0.4 \text{ Hz}$ for hhv. FCR-N og FCR-D evaluering. 1 pu aktiv effektrespons er den stasjonære responsen, ΔP_{SS} , til $F(s)$ ved 1 pu frekvensavvik.

Tabell 2-1: Modellering ved kravetterlevelse

	FCR-N	FCR-D Opp og Ned
G(s), Stability	$\frac{600 \text{ MW}}{0.1 \text{ Hz}} \frac{f_0}{S_{n,avg,Norden}} \frac{1}{2 H_{Norden} s + k_{f,Norden} f_0}$	$\frac{\Delta P_{SS}}{C_{FCR-D}} \frac{1450 \text{ MW}}{0.4 \text{ Hz}} \frac{f_0}{S_{n,avg,Norden}} \frac{1}{2 H_{Norden} s + k_{f,Norden} f_0}$
G(s), Performance	$\frac{600 \text{ MW}}{0.1 \text{ Hz}} \frac{f_0}{S_{n,avg,Norden}} \frac{1}{2 H_{Norden} s + k_{f,Norden} f_0}$	N/A (performance evalueres ikke i frekvensplanet)
D(s), forstyrrelsesprofil	$\frac{1}{70s+1}$ (kun for stabilitet)	N/A (performance evalueres ikke i frekvensplanet)



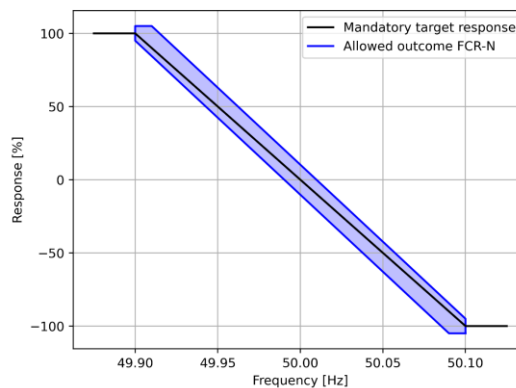
Figur 2-1: Modell av et frekvensregulert system til hvilket FCR-kravene for FCR-N er referert.

2.1 FCR-N

2.1.1 FCR-N Stasjonær respons

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.1.1 FCR-N Stationary Performance requirements

FCR-N-responsen skal være proporsjonal med frekvensavviket, symmetrisk rundt 50,0 Hz og fullt aktivert ved 49,9 og 50,1 Hz, henholdsvis opp og ned. FCR-enheter tillates å avvike noe, for eksempel for enheter med trappetrinnformet karakteristikk grunnet inn- og utkobling av laster, men da med maksimalt avvik fra et definert proporsjonalt bidrag. Dette er illustrert ved det blå området i Figur 2-2.



Figur 2-2: Stasjonær leveranse av FCR-N som ren proporsjonalkontroll (venstre), eller som diskret aktivering i steg (høyre).

2.1.2 FCR-N Performance

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.1.2 Dynamic performance requirement

Kravet er gitt ved FCR-N-enhetens effekt- og energirespons 60/180 sekunder etter en påtrykket frekvensrampe, illustrert i Figur 2-7. Responsen skal være iht. følgende kriterier

1. $|\Delta P_{60s}| \geq 0,63 \cdot |\Delta P_{ss}|$ [MW]
2. $|\Delta P_{180s}| \geq 0,95 \cdot |\Delta P_{ss}|$ [MW]
3. $|E_{60s}| \geq 24 \text{ s} \cdot |\Delta P_{ss}|$ [MW]

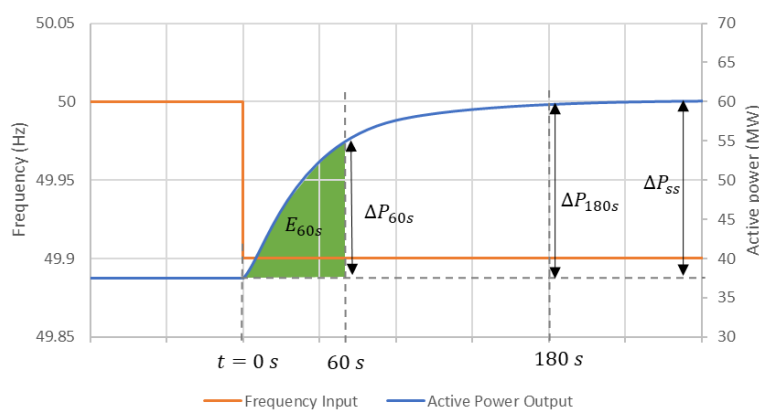
Hvor

ΔP_{60s} er den aktive effektresponsen 60 sekunder etter påtrykket frekvenssteg

ΔP_{180s} er den aktive effektresponsen 180 sekunder etter påtrykket frekvenssteg

ΔP_{ss} er den stasjonære responsen, dvs. Verdien hvor den aktive effekt stabiliseres, for stegene som er illustrert i Figur 2-3, $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ and ΔP_4 .

E_{60s} er den energien som er trukket eller levert de første 60 sekundene etter påtrykket frekvenssteg



Figur 2-3: Illustrasjon av krav til dynamisk respons for FCR-D.

Lukket sløyferespons er gitt som frekvensplanresponsen mellom ubalansen, d , og frekvensavvik, df , med henvisning til Figur 2-1. Lukket sløyferespons skal oppfylle kriteriet gitt av ligning 2.1. I praksis angir kravet hvor godt dempet sinusformede ubalanser ved ulike periodetider skal være. Kravet er illustrert i Figur 2-4.

$$\left| \frac{G(s)}{1-F(s)G(s)} \right| \leq \left| \frac{1}{D(s)} \right| \quad 2.1$$

Hvor $G(s)$ skal være:

$$G(s) = \frac{600 \text{ MW}}{0.1 \text{ Hz}} \frac{f_0}{S_{n,avg,norden}} \frac{1}{2 H_{avg,norden} s + k_{f,avg,norden} f_0} \quad 2.2$$

Og,

f_0 er 50 Hz

$S_{n,avg,norden}$ er 42 000 MW

$H_{avg,norden}$ er $\frac{190\,000 \text{ MWs}}{S_{n,avg,norden}}$

$k_{f,avg,norden}$ er 0,01 (last-frekvens-avhengighet)

2.1.3 FCR-N Stabilitet

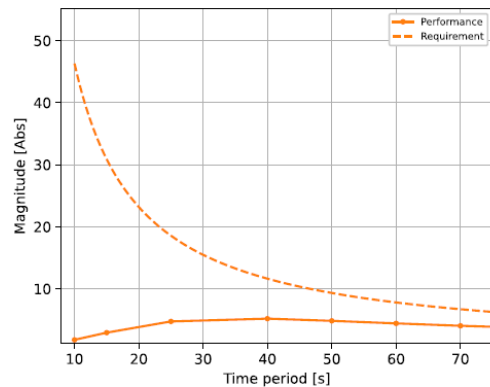
Technical Requirements for FCR [1], Section 3.1.3 FCR-N stability requirement

Kravet er gitt som kriterier til frekvensplanresponsen til FCR-enheten og systemet, ref. Figur 2-1, og den skal oppfylle kriteriene i ligning 2.3 og 2.4, som er Nyquist-kriteriet for stabilitet.

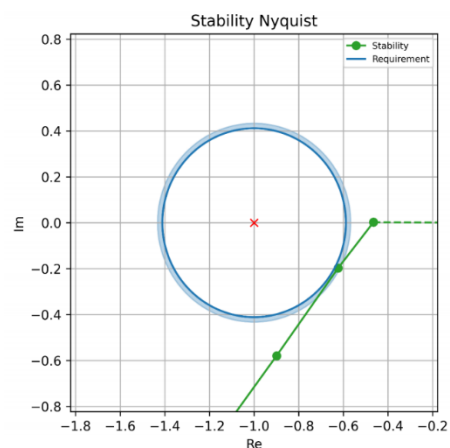
$$|F(s)G(s) + 1| \geq \frac{1}{M_s} \quad 2.3$$

Og:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{F(s)G(s) - 1\} &> 0, \\ \operatorname{Im}\{F(s)G(s) - 1\} &= 0 \end{aligned} \quad 2.4$$



Figur 2-4: Krav til demping av lastforstyrrelser, stiplet orange linje, for FCR-N-enheter. Eksempel på respons er vist i heltrukket orange linje.



Figur 2-5: Krav til stabilitetsmargin i Nyquist-diagrammet, blå sirkel, for FCR-N-enheter. Eksempel på respons er vist i grønt.

Hvor $G(s)$ skal være:

$$G(s) = \frac{600 \text{ MW}}{0.1 \text{ Hz}} \frac{f_0}{S_{n,min,Norden}} \frac{1}{2 H_{min,norden} s + k_{f,min,norden} f_0}$$

2.5

Og,

$$f_0 = 50 \text{ Hz}$$

$$S_{n,min,norden} = 23 \text{ 000 MW}$$

$$H_{min,norden} = \frac{120 \text{ 000 MWs}}{S_{n,min,norden}}$$

$$k_{f,min} = 0,005 \text{ (last-frekvens-avhengighet)}$$

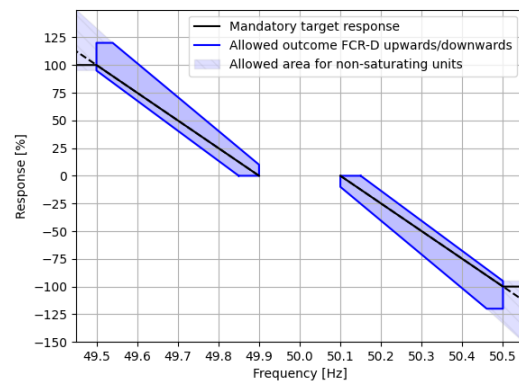
Nyquist-kurven i Figur 2-5 viser responsen til $F(s)G(s)$, og kravet om kurven ikke skal skjære den sorte sirkelen, hvilket er stabilitetsmarginen $1/Ms$, mot Nyquist-punktet $(-1,0)$ (ligning 2.3), og at kurven ikke skal omslutte ("passere til venstre for") Nyquist-punktet (ligning 2.4).

2.2 FCR-D

2.2.1 FCR-D Stasjonær respons

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.2.1 FCR-D Dynamic performance requirements

FCR-responsen skal være proporsjonal med frekvensavviket. FCR-D Opp skal aktiveres proporsjonalt mellom 49,9 og 49,5 Hz. FCR-D Ned skal aktiveres proporsjonalt mellom 50,1 og 50,5 Hz. FCR-enheter tillates å avvike noe, for eksempel for enheter med trappetrinnformet karakteristikk grunnet inn- og utkobling av laster, men da med maksimalt avvik fra et definert proporsjonalt bidrag. Dette er illustrert ved det blå området i Figur 2-7.



Figur 2-6: Stasjonær leveranse av FCR-N som ren proporsjonalkontroll (venstre), eller som diskret aktivering i steg (høyre).

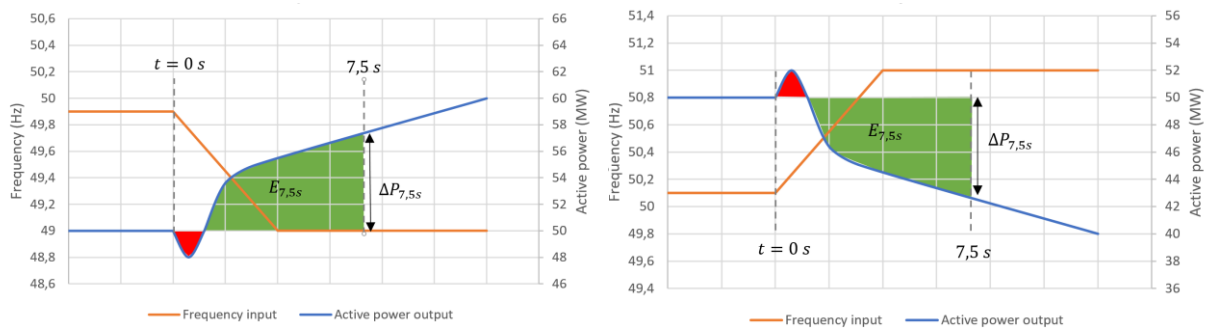
2.2.2 FCR-D Performance

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.2.2 FCR-D Dynamic performance requirement

Kravet er gitt ved FCR-D-enhetens effekt- og energirespons 7,5 sekunder etter en påtrykket frekvensrampe, illustrert i Figur 2-7. Responsen skal være iht. kriteriene i ligning 2.6 og 2.7.

$$|\Delta P_{7,5s}| \geq 0,93 \cdot |\Delta P_{ss}| [MW] \tag{2.6}$$

$$|E_{7,5s}| \geq 7,5s \cdot |\Delta P_{ss}| [MWs] \tag{2.7}$$



Figur 2-7: Illustrasjon av krav til dynamisk respons for FCR-D.

Dersom kriteriene ikke oppfylles kan allikevel enheten tillates å levere FCR-D, men kapasiteten begrenses av den dynamiske leveranseevnen, og hele den stasjonære leveransen kan ikke selges til markedet. Kapasiteten er gitt av ligning 2.8.

$$C_{FCR-D} = \min\left(\frac{\Delta P_{7,5s}}{0,93}, \Delta P_{ss}, \frac{E_{7,5s}}{7,5s}\right) \tag{2.8}$$

Når enheter kvalifiserer for et FCR-D volum som er mindre enn den stasjonære responsen, ΔP_{ss} , vil stabilitetskravet bli vanskeligere grunnet faktoren $\frac{\Delta P_{ss}}{C_{FCR-D}}$ som blir større enn 1 i modellen for $G(s)$ ¹. Dette er angitt med rødt i den tilpassede ligning 2.9.

$$G(s) = \frac{\Delta P_{ss}}{C_{FCR-D}} \frac{1450 MW}{0.4 Hz} \frac{f_0}{S_{n,avg,Norden} 2 H_{Norden} s + k_{f,Norden} f_0} \tag{2.9}$$

2.2.3 FCR-D Stabilitet

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.2.3 FCR-D stability requirement

Stabilitetskravet til FCR-D Opp og FCR-D Ned er likt som for FCR-N, se kapittel 2.1.3, med unntak av modellen for systemet, $G(s)$. Systemet skal være iht. ligningen 2.9.

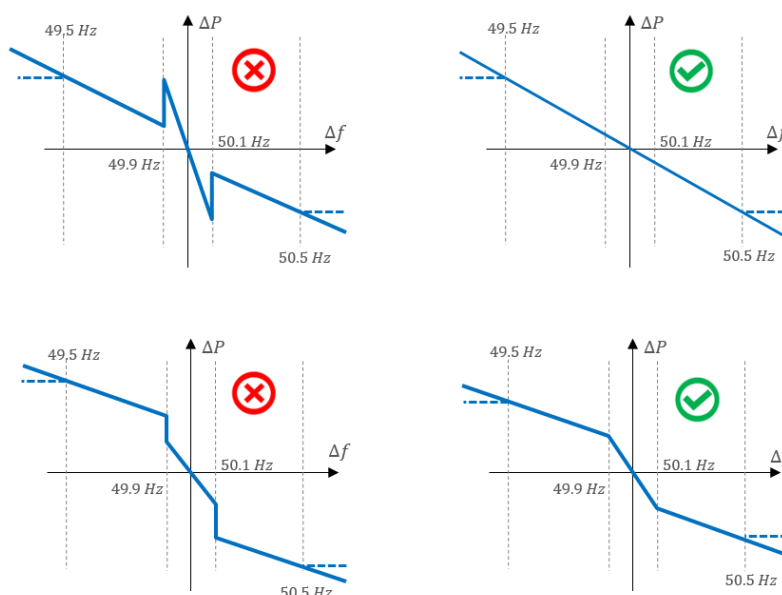
FCR-D-enheten skal oppfylle Nyquist-kriteriene for stabilitet, ligning 2.3 og 2.4 og illustrert i Figur 2-5.

¹ Dette for å hensynta at TSOene må anskaffe totalt mer FCR for å ha nok FCR leveranse ved 7,5 sekunder, og mer FCR-medførerer gjør stabilitet mer utfordrende.

2.3 Samtidig leveranse av FCR-N og -D

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.3 Providing both FCR-N and FCR-D

For enheter som leverer både FCR-N og -D, kan ulike parametere og regulatorstrukturer benyttes og endres/"switches" på den måten FCR-tilbyderen selv ønsker, så lenge den stasjonære leveransen er kontinuerlig over frekvensbåndet 49,5 til 50,5 Hz slik at FCR-N leveransen opprettholdes ved leveranse av også FCR-D Opp og/eller Ned. Dette er illustrert i Figur 2-8.



Figur 2-8: Illustrasjon av krav til kombinert FCR-N og -D respons.

2.4 Aggregering og sentralstyring

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.7 Requirements on the measurement system

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.6 Provision from centrally controlled FCR providing entities

Aggregering og sentralstyring av FCR-enheter skal oppfylle krav til oppetid/tilgjengelighet og prekvalifisering.

2.5 Målinger

Technical Requirements for FCR [1], Section 3.5 Provision from aggregated resources

Målenøyaktigheten skal være iht. Tabell 2-2. Oppløsningen på måledataene, antall desimaler, skal være iht. Tabell 2-3. Samplerate på målingene skal være minst 10 Hz for FCR-D og 5 Hz for FCR-N. Kravene gjelder for testing og datalogging.

Tabell 2-2: Krav til målenøyaktighet for testing og logging.

Måling	Kategori	Nominell effekt på målte enhet	Nøyaktighet
Aktiv effekt	1	< 2 MW	± 5%
	2	2 – 10 MW	±1%
	3	> 10 MW	± 0,5 %
Nettfrekvens	N/A	N/A	± 10 mHz
Påtrykket frekvenssignal	N/A	N/A	±10 mHz

Tabell 2-3: Krav til oppløsning på måling

Måling	Oppløsning på måling
Aktiv effekt	0,01 MW or 0,025%
Grid frequency	1 mHz
Applied frequency	1 mHz

2.6 Sanntidsdatautveksling

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.3 Real time telemetry

Statnett kan etterspørre sanntidsdata for FCR-leveranse.

2.7 Datalogging

Technical Requirements for FCR [1], Section 5.2 Data logging

FCR-enheter skal logge data for minst aktiv effekt og frekvens. Statnett kan etterspørre logging av ytterligere målinger.

Data for hver FCR-enhet skal lagres i 14 dager, med målinger med sampling rate ≤ 1 sekund. Aktørene velger selv hvordan dette oppfylles (PMU, lokalkontrollanlegg, vern med loggfunksjon etc.)

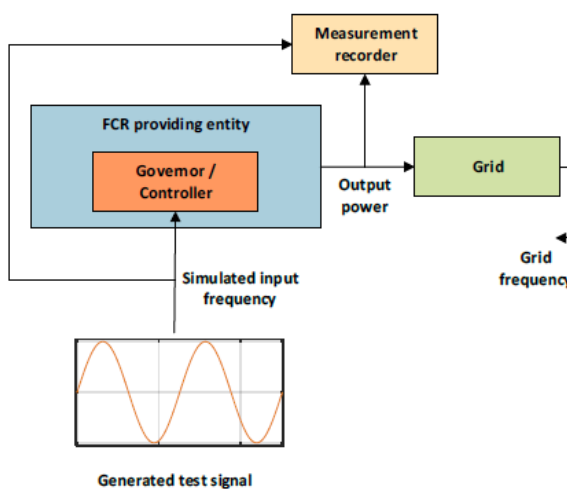
Data kan lagres på et hvilket som helst format som passer FCR-leverandøren, men skal være tilgjengelig på csv.-format for Statnett ved etterspørsel. Loggingen skal være tidsstemplet og synkronisert mot CET (Central European Time).

3 Krav til testing av FCR-leveranse

3.1 Generelt

Supporting Document for Technical Requirements for FCR [9], Section 3 Test procedure

Testene gjennomføres ved å påtrykke forhåndsdefinerte, fiktive frekvenssignaler til frekvensreguleringsløyfen, og måle aktiv effekt-respons. Dette er illustrert i Figur 3-1. Dette kan gjøres med eksternt testutstyr som tilkobles turbinregulator, eller med internt genererte signaler.



Figur 3-1: Prinsipiell virkemåte for prekvalifiseringstesting av FCR.

3.2 Driftspunkter for testing

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.1 Operational Test Conditions

Supporting document for Technical Requirements for FCR [9], Section 3 Test procedure

Prøver skal for hver av FCR-produktene, FCR-N, FCR-D Opp og FCR-D Ned, gjøres ved ulike driftspunkter for statikk og settpunkt for aktiv effekt

1. Høyeste settpunkt for aktiv effekt med høyeste statikk
2. Høyeste settpunkt for aktiv effekt med laveste statikk
3. Laveste settpunkt for aktiv effekt med høyeste statikk
4. Laveste settpunkt for aktiv effekt med laveste statikk

For disse lastpunkter og statikker kvalifiseres enheten for en bestemt kapasitet FCR. For lastpunkter og statikker mellom interpoleres det for å finne kapasiteten. Generelle unntak omfatter:

- For FCR-enheter som kun leverer FCR ved et lastpunkt kan 3. og 4. sløyfes
- For FCR-enheter som kun skal levere FCR ved én statikkinnstilling kan 2. og 4. sløyfes
- Dersom ett parametersett (PID eller lignende) er brukt ved ulike lastpunkter, gjennomføres sinustestene kun ved det lastpunktet hvor stabilitet er mest utfordrende.

Statnett kan i tillegg godkjenne unntak:

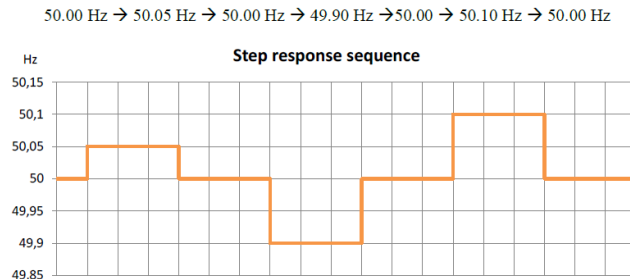
- For teknologier hvor settpunkt for aktiv effekt ikke påvirker evnen til å levere FCR kan tester ved lavt settpunkt sløyfes
- For teknologier hvor etterlevelse kan vises fra dokumentasjon eller erfaringer for gitte teknologi, kan ytterligere unntak gis av Statnett.

3.3 FCR-N Tester

3.3.1 FCR-N stegtester

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.4.1 FCR-N Step response sequence test

Stegtester gjøres for å evaluere stasjonær respons, lastregulering og for å utlede verdier for evaluering av sinusprøver.

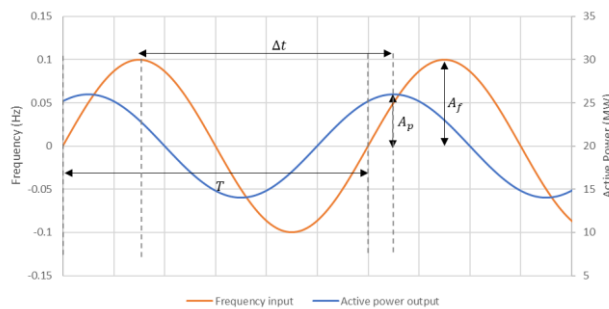


Figur 3-2: FCR-N testsekvens for stasjonær leveranse

3.3.2 FCR-N sinustester

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.4.2 FCR-N Sine tests

Sinustester gjøres for å evaluere stabilitet og lastregulering. Merk at lastregulering bare evalueres fra sinustestene på lastpunkter hvor sinustester er påkrevd. Periodeidene som skal testes er $T = [10, 15, 25, 40, 50, 60, 70]$.

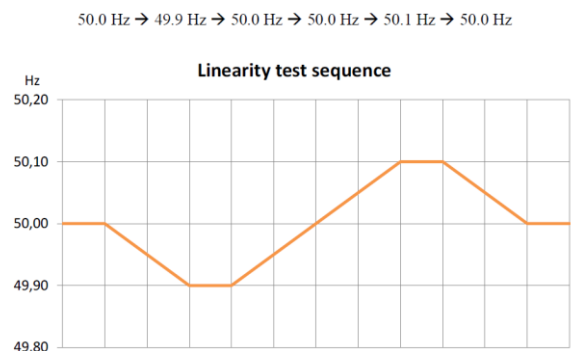


Figur 3-3: Sinustest som skal gjennomføres for FCR-N

3.3.3 FCR-N linearitetstest

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.4.1 FCR-N Linearity test

Linearitetstest gjennomføres for å bekrefte at FCR-N enheter aktiveres lineært mellom 49,9 og 50,1 Hz. Rampehastigheten skal være minst 0,5 mHz/s. En raskere rampe kan velges opp til 2 mHz/s, så lenge FCR-N også aktiveres lineært med rampene.



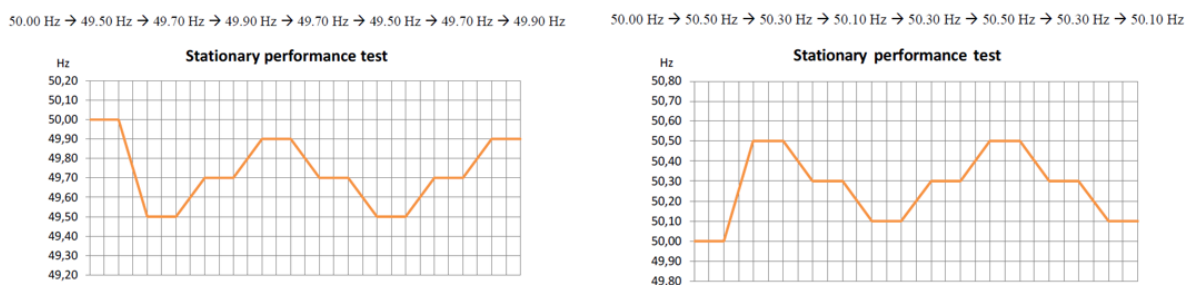
Figur 3-4: FCR-N linearitetstest FCR-D

3.4 FCR-D Tester

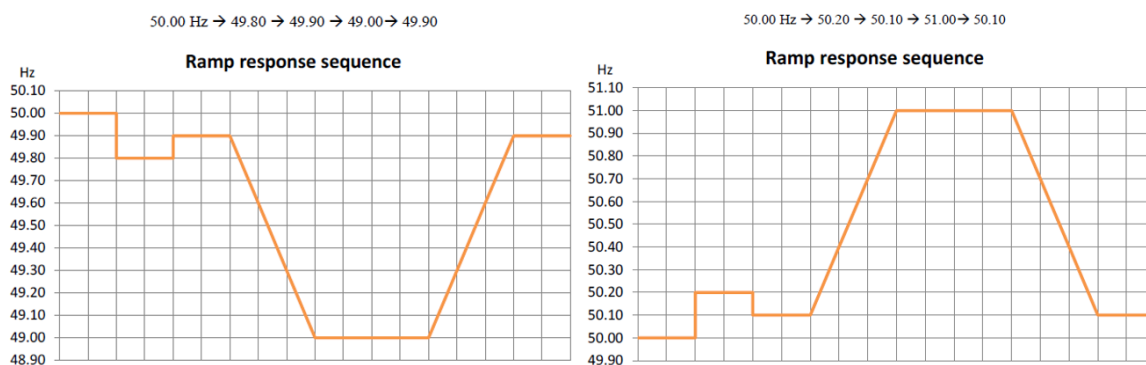
3.4.1 FCR-D Rampetester

- Technical Requirements for FCR [1], Section 4.5.1 FCR-D Upwards stationary performance test
- Technical Requirements for FCR [1], Section 4.5.2 FCR-D Upwards ramp response test
- Technical Requirements for FCR [1], Section 4.5.3 FCR-D Downwards stationary performance test
- Technical Requirements for FCR [1], Section 4.5.4 FCR-D Downwards ramp response test

Rampetester gjøres for å evaluere stasjonær respons, lastregulering og for å utlede verdier for evaluering av sinusprøver.



Figur 3-5: FCR-D Opp (venstre) og FCR-D Ned (høyre) testsekvens for stasjonær leveranse



Figur 3-6: FCR-D Opp (venstre) og FCR-D Ned (høyre) testsekvens for performance

3.4.2 FCR-D sinustester

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.5.5 FCR-D sine tests

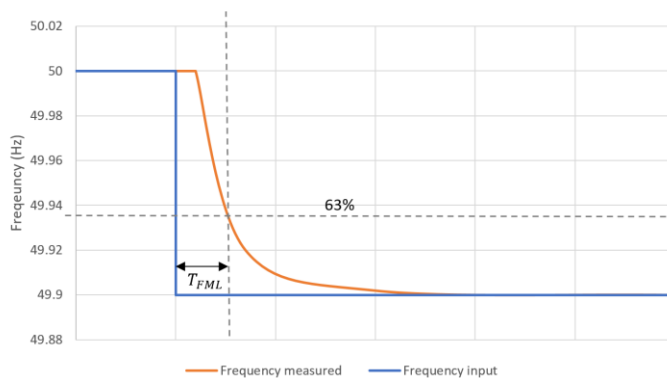
Sinustester gjøres for å evaluere stabilitet. Periodetidene som skal testes er T = [10, 15, 25, 40, 50]. Dersom samme regulatorparametere benyttes for FCR-N og -D kan testresultatene fra FCR-N testing gjenbrukes dersom de er gjort først.

3.5 Andre tester

3.5.1 Frekvensmålesløyfe

Supporting document for Technical Requirements for FCR [9], Section 3.3.1 Separate test of frequency measurement loop

Dersom intern software/programvare for testing benyttes, og frekvensmålesløyfen ikke kan dokumenteres, skal denne testes ved en stegrespons.



Figur 3-7: Test av frekvensmålesløyfe ved stegvis endring av påtrykket frekvens (blå) og respons (oransje)

3.5.2 Høy performance/høy stabilitet parametersett

Supporting document for Technical Requirements for FCR [9], Section 3.3.3 FCR-D with separate high performance and high stability parameters

Dersom ulike regulatorparametersett benyttes for transient og stasjonær fase for å optimere performance og stabilitet hver for seg, skal sinustester gjennomføres for begge regulatorparametersett.

3.5.3 En-timestest av FCR-N

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.7 Test report

En time kontinuerlig drift med aktivert FCR, minst FCR-N, skal gjennomføres. Dersom kun FCR-D er testet kan dette utelates.

4 Evaluering av kravetterlevelse

4.1 Utledning av transferfunksjonen for FCR-enheten fra tester

Supporting Document on Technical Requirements for FCR [9], Section 4.1 Deriving FCR-N and FCR-D transfer function values from testing

Merk at det tilgjengeliggjøres et IT-verktøy fra de nordiske TSOene som automatisk gjør utregningene i dette kapitlet.

For å evaluere frekvensplanresponsen benyttes transferfunksjonsverdier ved spesifikke testede periodetider. Til å begynne må den stasjonære effektresponsen og påvirkningen av backlash dokumenteres.

Normaliseringseffekten, den stasjonære aktiv effekt responsen regnes ut fra steg og ramperesponsene, vist i Figur 4-1, iht. ligning 4.1.

$$\Delta P_{normalization} = \frac{|\Delta P_1| + |\Delta P_3|}{2} [MW] \quad 4.1$$

Backlash beregnes iht. ligning 4.2.

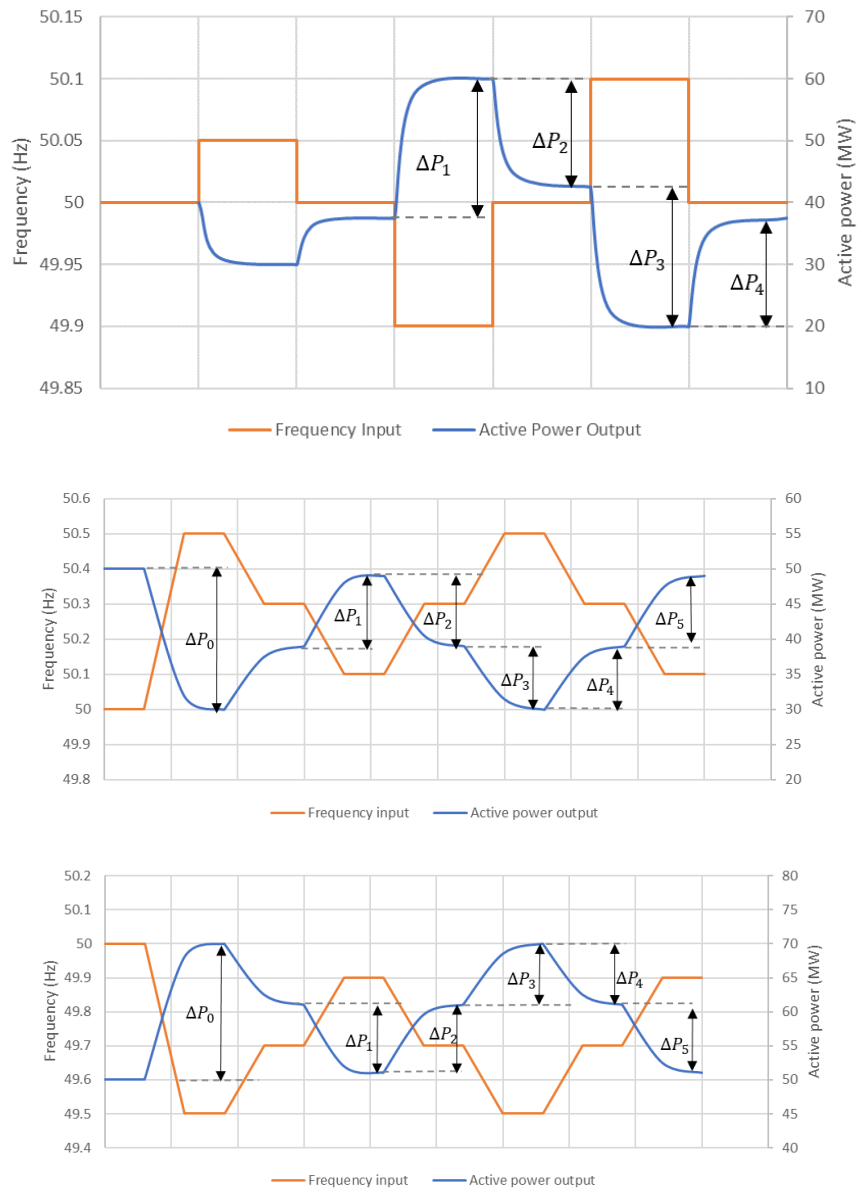
$$2D_{pu} = \frac{|\Delta P_1| - |\Delta P_2| + |\Delta P_3| - |\Delta P_4|}{2\Delta P_{normalization}} [MW] \quad 4.2$$

Hvor $|\Delta P_x|$ henviser til responsene som er illustrert i Figur 4-1 og oppgis i MW.

Et tabelloppslag, se Supporting Document [9], benyttes for å kompensere for backlashens innvirkning ved en konstant, h. Videre beregnes normaliseringsfaktoren iht. ligning 4.3.

$$e = \frac{h \Delta P_{normalization}}{A_{step}} [MW/Hz] \quad 4.3$$

Hvor A_{step} er frekvensendringene i steg og ramperesponsene i Figur 4-1, hhv. 0,1 og 0,2 Hz for FCR-N og FCR-D.



Figur 4-1: Stegresponsstester for måling av backlash og beregning av normaliseringsfaktoren.

Videre benyttes målingene fra sinustesting for å utlede faseforskyvning og forsterkning. Vinkelfrekvensen (rad/s) for en gitt testet periodetid, T , er gitt ved

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{4.4}$$

Forsterkningen regnes ut ved

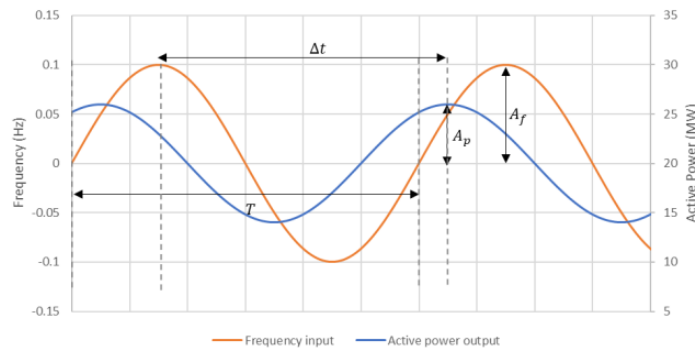
$$|F(j\omega)| = \frac{A_p}{e A_f} \tag{4.5}$$

Hvor A_p er amplituden til den aktive effektresponsen (MW), A_f er amplitude på det påtrykkede frekvenssignalet og e er normaliseringseffekten.

Faseforskyvningen (grader) beregnes ved

$$\varphi = \text{Arg}(F(j\omega)) = \Delta t \frac{360^\circ}{T} \tag{4.6}$$

Hvor T er periodetiden på den teste sinusperioden (s) og Δt er tidsforskjellen (s) mellom det påtrykkede frekvenssignalet og aktiv effektrespons, som vist i Figur 4-2.



Figur 4-2: Sinustester og målinger for utledning av faseforskyvning og forsterkning

For evaluering av kravetterlevelse benyttes verdien fra sinustestene, sammen verdier som representerer kraftsystemets dynamikk, $G(s)$, utregnet fra dets transferfunksjon for de testede periodetidene. Merk at transferfunksjonene for systemet er ulike for stabilitet og lastreguleringsevne, samt ulike mellom FCR-N og -D. Dette stammer fra systemets behov.

$$G(s) = \frac{600 \text{ MW}}{0.1 \text{ Hz}} \frac{f_0}{S_{n,min,Norden}} \frac{1}{2 H_{min,norden} j\omega + k_{f,min,norden} f_0} \quad 4.7$$

$$G(s) = \frac{\Delta P_{ss}}{C_{FCR-D}} \frac{f_0}{S_{n,avg,Norden}} \frac{1}{2 H_{Norden} j\omega + k_{f,Norden} f_0} \quad 4.8$$

Hvor

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ and T is the tested time periods.

f_0 er nominell frekvens, 50 Hz

k_f er frekvens-lastvariasjon

H er inertikonstanten til kraftsystemet

S_n er den nominelle effekten til kraftsystemet.

I tillegg regnes verdier ut som representerer systemets forstyrrelser, $D(s)$, ved de samme periodetidene.

$$|D(j\omega)| = \left| \frac{1}{70j\omega + 1} \right| \quad 4.9$$

Et eksempel på utregning av kravetterlevelse er gitt av under. Faseskift og forsterkning er gitt av de hvite cellene i Tabell 4-1. Øvrige verdier er regnet ut. Tabell 4-2 og Tabell 4-3 viser transferfunksjonsverdiene for hhv åpen og lukket sløyferesponsen.

Tabell 4-1: Eksempel på beregning av frekvensplanrespons for en FCR-N enhet.

Periodetid, T (s)	$F(j\omega)$		$G_{min}(j\omega)$ (stabilitet)		$G_{avg}(j\omega)$ (lastregulering)	
	$ F(j\omega) $	$\arg(F(j\omega))$ (degrees)	$ G_{min}(j\omega) $	$\arg(G_{min}(j\omega))$ (grader)	$ G_{avg}(j\omega) $	$\arg(G_{avg}(j\omega))$ (grader)
10	0.2340	87.5660	1.9808	-87.8163	1.2517	-84.9735
15	0.2194	104.2934	2.9793	-86.7265	1.8685	-82.4843
25	0.2161	117.3542	4.9511	-84.5546	3.0679	-77.5989
40	0.2278	122.6276	7.8668	-81.3279	4.7411	-70.6173
50	0.2404	123.5015	9.7712	-79.2059	5.7509	-66.2615
60	0.2553	123.7382	11.6360	-77.1134	6.6675	-62.1783
70	0.2721	123.7617	13.4550	-75.0552	7.4897	-58.3803

Tabell 4-2: Eksempel på beregning av åpen sløyfe frekvensplanrespons for én FCR-N enhet.

Periodetid, T (s)	Reell del av åpen sløyfe transferfunksjonen, $Re\{1 - F(j\omega)G_{min}(j\omega)\}$	Imaginær del av åpen sløyfe transferfunksjonen, $Im\{1 - F(j\omega)G_{min}(j\omega)\}$	Forsterkningen til åpen sløyfe transferfunksjonen $ 1 - F(j\omega)G_{min}(j\omega) $
0	0	0	0
10	0.5349	0.0020	0.5349
15	0.3768	-0.1973	0.4253
25	0.1008	-0.5795	0.5882
40	-0.3465	-1.1829	1.2326
50	-0.6812	-1.6403	1.7761
60	-1.0404	-2.1596	2.3971
70	-1.4158	-2.7504	3.0934

Tabell 4-3: Eksempel på beregning av lukket sløyfe frekvensplanrespons for én FCR-N enhet.

Periodetid, T (s)	Forsterkningen til lukket sløyfe transferfunksjon, $S(j\omega)G(j\omega) = \left \frac{G_{avg}(j\omega)}{1 - F(j\omega)G_{avg}(j\omega)} \right $	Ubalanseprofil, $\frac{1}{ D(j\omega) }$
10	1.7690	43.9937
15	2.9296	29.3386
25	4.7328	17.6213
40	5.1822	11.041
50	4.8346	8.8531
60	4.4188	7.3983
70	4.0296	6.3623

4.2 Evalueringer ved felles vannvei

Technical Requirements for FCR [1], Section 4.2 Ambient test conditions

Ved felles vannvei og prekvalifisering av flere generatorer testes en og en generator separat. Pga. gjensidig påvirkning skal analyser gjennomføres som:

- Verifiserer testene på enkeltgeneratorer hensyntatt driften av øvrige generatorer, og
- Evaluerer samtidig leveranser ved simulering

5 Søknadsprosess

FCR-tilbyderen skal sende inn en søknad iht. kravene til dokumentasjon. Statnett skal behandle og gi tilbakemelding iht. etablerte prosess og behandlingstid (ikke etablert pr. dags dato).

Statnetts metode for evaluering av etterlevelse av de tekniske kravene til FCR er den endelige. Metoden, et IT-verktøy, gjøres tilgjengelig for aktørene.

6 Operasjonelt

For FCR-tilbydere som får tilslag i markedene, skal FCR-enheten levere FCR i hele driftstimen. Lastpunktet og innstilt statikk avgjør hva FCR-kapasiteten(e) er. Det er ikke besluttet om det skal være verifisering av bud i IT-løsningene før eller etter driftstimen, eller om det skal være aktørens ansvar. Aktører som ikke har tilslag i markedet skal ha deaktivert frekvensregulering, eventuelt minst deaktivert i frekvensområdet 49,5 til 50,5 Hz. For produksjonsanlegg med spesiell betydning for forsyning av lokal last, skal det være funksjonalitet for separatdriftsdeteksjon (FCR-I) [6] [10].

7 Markedsløsning

Vilkår for tilbud, aksept, rapportering og avregning i marked for FCR [8]
Vedtak om levering og betaling for systemtjenester 2020 [11]

Ved innføring av ny FCR-spesifikasjon planlegges praksisen med grunnleveranse å opphøre. Dvs. at all FCR anskaffes gjennom markeder, tilbudt av prekvalifiserte aktører. Eventuell frekvensregulering som leveres utenfor dette, vil ikke gis restleveranse-pris. Unntak gjelder der hvor separatdrift er blitt aktivert.

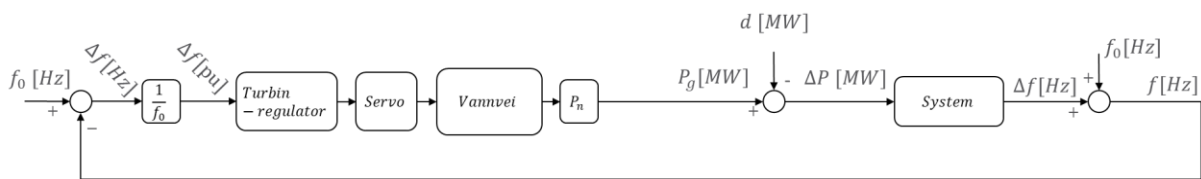
For øvrig vil markedsløsningen, inkl. minstebud, budtidspunkter, uke/døgn-markeder, avregning osv. være uavhengig av ny teknisk FCR-spesifikasjon.

8 Bibliografi

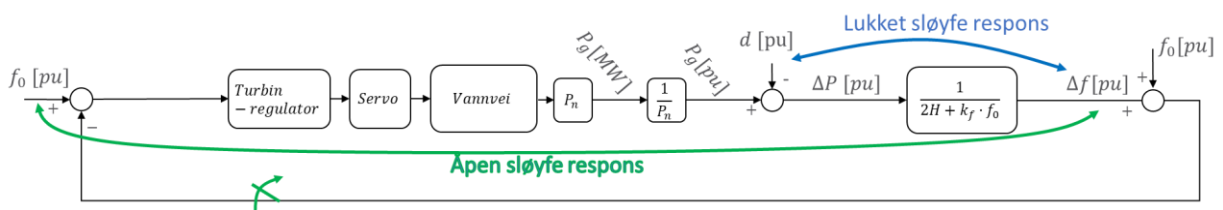
- [1] NAG, «Technical Requirements for Frequency Containment Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area,» [Internett].
- [2] NAG, «FCR-N design of requirements,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/utvikling-av-kraftsystemet/nordisk-frekvensstabilitet/fcr-n-design-of-requirements.pdf>.
- [3] NAG, «FCR-D Design of requirements,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/utvikling-av-kraftsystemet/nordisk-frekvensstabilitet/fcr-d-design-of-requirements.pdf>.
- [4] «FCR-D Design of requirements - Phase 2,» <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/utvikling-av-kraftsystemet/nordisk-frekvensstabilitet/fcr-d-design-of-requirements--phase-2.pdf>, 2019.
- [5] Official Journal of the European Union, «System Operation Guideline,» [Internett]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R1485>.
- [6] Statnett SF, «Nasjonal Veileder for Funksjonskrav - NVF,» 2020. [Internett].
- [7] Statnett, «System- og markedsutviklingsplan,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/utvikling-av-kraftsystemet/systemdrifts-og-markedsutviklings/>.
- [8] Statnett SF, «Vilkår for tilbud, aksept, rapportering og avregning i marked for FCR,» [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/market/reservemarkeder/vilkar-for-markedet-for-primarreserve---fcr---gjeldende-fra-09122019.pdf>.
- [9] NAG, «Supporting Document for Technical Requirements for Frequency Containment Reserves in the Nordic synchronous area (Draft for Pilot),» 2021.
- [10] «Funksjonalitet for separatdriftsregulering og deteksjon,» 2018. [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/contentassets/58b9643b54c1460093c44fec3ceb82b9/funksjonalitet-for-separatdriftsregulering-og-deteksjon.pdf>.
- [11] Statnett SF, «Vedtak om levering og betaling for systemtjenester 2020, jf.,» [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/contentassets/80cde968deee4d129ca493cf651614b2/vedtak-om-leveranse-og-betaling-for-systemtjenester-2020.doc...pdf>.
- [12] Statnett, «Vilkår for tilbud, aksept, rapportering og avregning i marked for FCR,» [Internett]. Available: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/primarreserver/>.
- [13] NAG, «Supporting Document Technical Requirements for Frequency Containment Reserves in the Nordic Synchronous Area,» 2021.

9 Vedlegg A - Modellering – Klassisk modell vs. Nordisk FCR-modell

Med klassisk modell menes den modellen som tradisjonelt er benyttet i norsk vannkraftteknikk. Den er blitt benyttet i FIKS2012, videreføres i Nasjonal Veileder for Funksjonskrav (som erstatter FIKS2012) og er blir benyttet av kraftprodusenter og konsulenter for å evaluere frekvensreguleringsegenskaper. Tradisjonelt er egenskapene evaluert med statikk lik 0. Modellen er vist med benevnninger i Figur 9-1 og på per unit form i Figur 9-2.



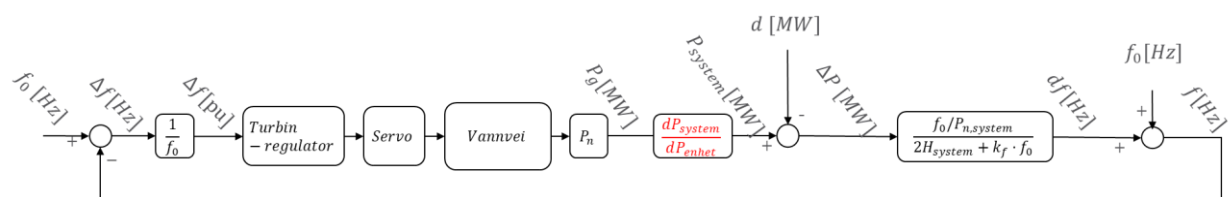
Figur 9-1: Klassisk modellering av frekvensreguleringsegenskaper på eget nett med benevnninger.



Figur 9-2: Klassisk modellering av frekvensreguleringsegenskaper på eget nett i per unit verdier. Blå pil, lukket sløyfe respons, illustrert at responsen beskriver hvordan en lastforstyrrelse fører til frekvensvariasjoner. Grønn pil, åpen sløyfe respons, illustrerer hvordan det regulerede systemet responderer på en frekvensforstyrrelse og brukes for å evaluere stabilitet (Nyquist- eller Bode-diagram). Merk at det ikke er frekvenstilbakekobling i åpen sløyfe.

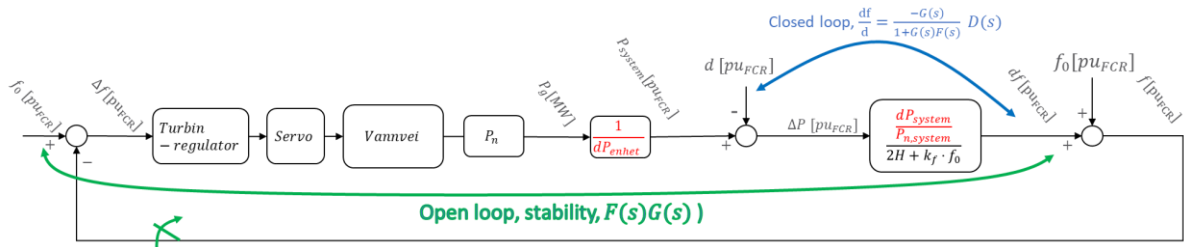
FCR-modellen er prinsipielt lik den klassiske modellen i form, men skiller seg ved at frekvensreguleringen evalueres i kontekst av det nordiske systemet, ikke relatert egen generatorytelse. De fire forskjellene er:

1. Inertiakonstatnen, H , er systemets treghetskonstant, ikke enheten selv.
2. Det nordiske systemet skal alltid ha en regulerstyrke på 6000/3250 MW/Hz for FCR-N/-D. Det innebærer at modellen må hensynta den enkelte enhetens relative betydning for FCR-leveransen. Dette gir tillegget av faktoren i rødt vist i Figur 9-3.
3. FCR-modellen har andre baseverdier for per unit, med grunnverdiene er $df = 0.1/0.4$ Hz og $dP_{system} = 600/1450$ MW for FCR-N/-D.
4. dP_{enhet} er enhetens stasjonære leveranse av FCR-N eller FCR-D ved df . dP_{enhet} vil variere med statikk, og er grunnen til at kravetterlevelse må vurderes ved ulike statikk-innstillinger.



Figur 9-3: Modellering av FCR-leveranse til det nordiske systemet i med benevnninger.

Dersom man stikker om blokkene i Figur 9-3 kan man sammenligne direkte med modellen for analyse av egenskaper på eget nett, Figur 9-2. Tilleggene i rødt viser endringene, og relaterer responsen til behovet til nordisk frekvensregulering, fremfor separatudriftsregulering.



Figur 9-4: Modellering av FCR-leveranse til det nordiske systemet i per unit verdier (*pu* angir FCR-enhetesnivå (generatormerkeverdier), dvs referert enhetens nominelle ytelse, og *pu_{FCR}* angir nordisk nivå).

10 Vedlegg B – Notasjoner og benevninger

FCP	Frequency containment process
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Disturbances
FCR-N	Frequency Containment reserve for normal operation
pu	Per unit
C_{FCR-D}	Kvalifisert kapasitet FCR-D
D [%]	Backlash/mekanisk dødbånd (definert med \pm dvs, totalt er 2D)
D(s)	Transferfunksjonen som beskriver ubalansen til kraftsystemet
d [MW]	Ubalanse
e	Normaliseringseffekt
e_p [%]	Droop /statikk
E	Energi
Δf [Hz]	Nettets frekvensavvik
df [Hz]	Grense for frekvensavvik, hhv. 0.1 Hz og 0.4 Hz for FCR-N og FCR-D (FCR-D regnes fra 49.9 til 49.5 Hz og 50.1 til 50.5 Hz)
ΔP_{ss}	En FCR-enhets stasjonære FCR-respons ved frekvenssteg lik df (ss=steady state)
ΔP_x	En FCR-enhets stasjonære FCR-respons ved et frekvenssteg
$F(s)$	Transferfunksjonen til en FCR-enhet
f_0 [Hz]	Nominell nettfrekvens
$G(s)$	Transferfunksjonen til systemet
h	Faktor fra beskrivende funksjon for dødbånd
H_{system} [s]	Inertiakonstanten til systemet
k_f [%/Hz]	Last-frekvensavhengigheten
K_{sat}	Metningsfaktor
M_s	Maximal sensitivitet
r	Radius på stabilitetsmargin i Nyquist-diagrammet
$S_{n,system}$ [MW]	Systemets samlede produksjon
$s = j\omega$	Laplace operatør og kompleks vinkelfrekvens
$S(s)$	Sensitivitetsfunksjon
T	Periodetid, sekunder
T_s [s]	Tidskonstant ledeapparat
T_w [s]	Tidskonstant vannvei