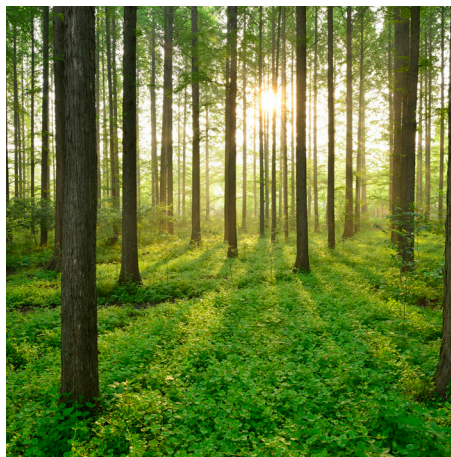


VÄTGAS FÖR ETT BALANSERAT ELSYSTEM – ANALYS AV STÖDTJÄNSTMARKNADER

RAPPORT 2024:994



VÄTGASENS ROLL I ENERGI- OCH
KLIMATOMSTÄLLNINGEN



Vätgas för ett balanserat elsystem – Analys av stödtjänstmarknader

REBECCA ROUPE, GUSTAF RUNDQVIST YEOMANS
ERIK ÖSTLING, FRANK KRÖNERT SWECO

ISBN 978-91-7673-994-5 | © Energiforsk februari 2024

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Vätgasen har en stor potential, inte bara som bränsle och råvara i transport- och industrisektorn. Med vätgas kan man också lagra energi och flytta laster i tiden inom elsektorn vilket kommer att behövas i allt större utsträckning när andelen väderberoende kraftslag ökar i energimixen. Eftersom vätgas är sektoröverskridande krävs många nya samarbeten mellan olika aktörer i samhället.

I framtidens förnybara elsystem kommer effektutmaningar relaterade till överskotts- och underskottssituationer att uppstå. Här kan vätgasen fylla en viktig roll. Eftersom vätgasen konkurrerar med en mängd andra alternativ som har liknande balanserande och flexibla förmågor finns det ett stort behov att ta ett helhetsgrepp om alternativen. Detta har projektgruppen gjort genom att använda energisystemmodellering samt analysera stödtjänstmarknader. Det behövs även kunskap om hur aktörer agerar när det gäller investeringar och driftsbeslut. Därför har man även analyserat aktörsperspektivet..

Projektet omfattar tre arbetspaket som avlämnat separata rapporter: AP1 Analys ur energisystemperspektiv, AP2 Analys av stödtjänstmarknader (denna rapport), samt AP3 Analys ur aktörsperspektiv. De övergripande resultaten och slutsatserna för projektet som helhet presenteras i rapporten "Vätgas för ett balanserat elsystem – Syntesrapport".

Projektet har genomförts av ett gemensamt team bestående av Martin Hagberg (projektledare), Julia Renström, Thomas Unger från Profu; Maria Edvall och Camille Hamon från Rise; samt Frank Krönert, Rebecca Roupe, Gustaf Rundqvist Yeomans och Erik Östling från Sweco.

Ett tack till referensgruppen som har bestått av representanter från Energiföretagen Sverige, Energigas Sverige, Fu-Gen Energi, Hitachi Energy, Jönköping Energi, Sundsvall Elnät, Krafringen, Mälarenergi, Siemens Energy, Svea Vind Offshore, Svensk Vindenergi, Svenska Kraftnät och Varberg Energi.

Studien har genomförts inom Energiforsks program *Vätgasens roll i energi- och klimatomställningen* och har finansierats via Energiforsk av närmare 40 företag och organisationer. Programmets mål är att underlätta integreringen av vätgas och att öka kunskapen om vätgasteknik, marknadsmässiga förutsättningar och potentialen för olika tillämpningar ur ett systemperspektiv. Det syftar också till att stödja affärsutveckling och tillväxt inom vätgasområdet samt att samla den pågående vätgasforskningen i olika delar av landet under samma paraply.

Sara Hugestam

Energiforsk, februari 2024

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Rapporten analyserar vätgasens roll för den kortsiktig balansering av elsystemet, med fokus på de specifika marknaderna för stödtjänster. Vidare undersöks den tekniska potentialen hos vätgasdrivna gasturbiner och bränsleceller för att tillhandahålla stödtjänster genom att producera el från vätgas. Gasturbiner och bränsleceller som använder vätgas kan ur ett tekniskt perspektiv bidra med flertalet stödtjänster så som mFRR och FCR. Båda teknologierna har dock idag höga kostnader jämfört med andra befintliga och kommande alternativ så som Batterilager, vind och flexibel förbrukning.

I denna rapport undersöks hur vätgas kan bidra till den kortsiktiga balanseringen av elsystemet, vilket är avgörande för att upprätthålla frekvensstabiliteten och säkerheten i elförsörjningen. Rapporten fokuserar på de specifika marknaderna för stödtjänster, som i nuläget är uppdelade i fem produkter: FFR, FCR-N, FCR-D, aFRR och mFRR. Dessa produkter har olika tekniska krav och kompensationsmodeller, och efterfrågan på dem förväntas delvis öka i framtiden i takt med att elsystemet övergår till mer variabla och väderberoende produktionskällor. Ökningen kan främst hänföras till ett elsystem med lägre rotationsenergi vilket ger ett mer lätt stört system med ökat volymbehov av FFR. Även den pågående framtidssäkringen av hur elsystemet balanseras medför ett stödtjänstbehov mer jämnt fördelat över Sverige och därmed ett förändrat och ökat behov av aFRR och mFRR.

Rapporten analyserar även de tekniska förutsättningen för att använda vätgasbaserad kraftproduktion, nämligen gasturbiner och bränsleceller, för att delta på marknaderna för stödtjänster. Analysen tar utgångspunkt i nuvarande teknikutvecklingen samt deras nuvarande prestanda.

De viktigaste resultaten i rapporten är att för de olika elektrolysörteknikerna som finns tillgängliga eller är under utveckling erbjuder PEM-tekniken den största möjligheten för kortsiktig balansering av elsystemet, medan alkaliska och SOEC-tekniker skulle kunna nyttjas om de kombineras med teknologi som kan ta hand om snabb upprampning och variationer i reglerbehov. Gällandet vätgasdrivna gasturbiner och bränsleceller är att de tekniskt kan tillhandahålla stödtjänster genom att producera el från vätgas, men de står inför flera utmaningar och begränsningar. För närvarande är gasturbiner mest lämpade för mFRR, där aktiveringstiden och energivolymen är relativt stor. Utveckling pågår dock och vätgasdrivna gasturbiner kan pga vätgasen stabila förbränningsegenskaper framöver möjligen även delta på övriga stödtjänstmarknader. Bränsleceller kan främst bidra med FCR där aktiveringstiden och energivolymen är relativt liten. Slutsats är att vätgasbaserad kraftproduktion sannolikt inte kommer att vara ett konkurrenskraftigt alternativ för kortsiktig balansering på stödtjänstmarknaderna på kort sikt, på längre sikt dock om det sker betydande förbättringar i framförallt investeringskostnaden för dessa teknologier kan de möjligen vara med och konkurrera.

Nyckelord

Vätgas, balansering elsystem, elektrolysörer, stödtjänster, frekvensmarknad

Summary

The report analyses the role of hydrogen in the short-term balancing of the electricity system, with a focus on the specific markets for frequency services. Furthermore, the potential of hydrogen-powered gas turbines and fuel cells to provide frequency services by producing electricity from hydrogen is investigated. Gas turbines that use hydrogen are more suitable for mFRR, while fuel cells can contribute both with FCR and mFRR. However, today both technologies have high costs and low efficiency compared to other existing and future alternatives such as battery storage, wind and flexible consumption.

This report examines how hydrogen can contribute to the short-term balancing of the electricity system, which is crucial for maintaining frequency stability and security of electricity supply. The report focuses on the specific markets for frequency services, which are currently divided into five products: FFR, FCR-N, FCR-D, aFRR and mFRR. These products have different technical requirements and compensation models, and the demand for them is expected to partly increase in the future as the electricity system shifts to more variable and weather-dependent generation sources. The increase in demand is mainly attributable to an electrical system with lower rotational energy, which results in a more easily disturbed system with an increased volume requirement for FFR. The ongoing future-proofing of how the Nordic electricity system is balanced also entails a need for frequency services more evenly distributed across Sweden and thus a changed and increased need for aFRR and mFRR.

The report also analyses the technological prerequisites for the use of hydrogen-based power generation, namely gas turbines and fuel cells, to participate in frequency services markets. The analysis considers the current and future development of these technologies, as well as their performance.

The key findings of the report are that for the various electrolyzer technologies available or under development, PEM technology offers the greatest opportunity for short-term balancing of the electricity system, while alkaline and SOEC technologies could be used if combined with technology that can take care of rapid ramp-up and variations in control needs. Regarding hydrogen-powered gas turbines and fuel cells technically can provide frequency services by producing electricity from hydrogen, but they face several challenges and limitations. Currently gas turbines are most suitable for mFRR, where the activation time is slower and used energy volume are relatively large (compared to other services), Fuel cells can mainly contribute with FCR where the activation time is short and used energy volume is relatively small. Conclusion is that hydrogen-based power generation is unlikely to be a competitive option for short-term balancing in frequency services markets in the short term, however in the longer term if there are significant improvements in investment cost for these technologies they may be able to compete.

Innehåll

1	Inledning	10
2	Stødtjänstmarknader idag	10
2.1	FFR (Fast Frequency Reserve)	14
2.2	FCR (Frequency containment Reserve)	14
2.2.1	FCR-N (Frequency Containment Reserve – Normal)	14
2.2.2	FCR-D (Frequency Containment Reserve – Distributed)	14
2.3	FRR (Frequency Restoration Reserve)	15
2.3.1	aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve)	15
2.3.2	mFRR (manual Frequency Restoration Reserve)	15
3	Pågående utveckling av stødtjänstermarknaderna	15
3.1	FCR	16
3.2	mFRR kapacitetsmarknad	16
3.3	mFRR EAM (Förändrad nordisk energiaktiveringsmarknad)	17
4	Balansering genom flexibel elanvändning vid produktion av vätgas	17
4.1	Teknisk förmåga	17
4.2	Ekonomiska förutsättningar	22
5	Balansering genom produktion av el från vätgas	23
5.1	Teknisk förmåga Gasturbiner och bränsleceller	23
6	Vätgasens roll för den kortsiktiga balanseringen	26
7	Slutsats och diskussion	28
	Referenslista	30

Ordlista och förkortningar

aFRR	automatic Frequency Restoration Produkte
FCR-D ned	Frequency Containment Produkte – Disturbed ned
FCR-D upp	Frequency Containment Produkte – Disturbed upp
FCR-N	Frequency Containment Produkte – Normal
FFR	Fast Frequency Produkte
mFRR	manual Frequency Restoration Produkte
PEM	Proton Exchange Membrane
SOFC	Solid Oxide Electrolyzer Cell

1 Inledning

I AP2 – denna rapport - analyserade vi vätgasens roll för den mycket kortsiktiga balanseringen som sker på de specifika marknaderna för stödtjänster. Eftersom behovet av stödtjänster delvis bedöms öka i framtiden och flera nya teknologier kan spela en roll varav elektrolysörer och vätgasbaserad elproduktion är en möjlig teknologi undersöker rapporten möjligheten för just vätgasrelaterade resurser. Det är också viktigt att sätta in detta i utvecklingen av marknaderna för stödtjänster och hur dessa utvecklas.

Det är endast med vätgasen satt i sitt sammanhang som dess konkurrenskraft för elsystemflexibilitet kan utvärderas. Det finns som bekant en mängd andra alternativ som också har förmåga att bidra till balansering och flexibilitet och det är dessa som vätgastillämpningarna måste "tävla med".

2 Stödtjänstmarknader idag

I det svenska elsystemet måste produktion i varje stund anpassas till det rådande behovet av el – om det uppstår obalans syns det genom förändringar i systemets frekvensnivå där normal frekvensnivå är 50 Hz med en variation +/- 0,1 Hz. Om elproduktion överstiger elanvändning stiger frekvensen. Om elproduktionen understiger elanvändningen sjunker frekvensen. Dessa obalanser uppstår kontinuerligt i systemet och hanteras bland annat genom att anläggningar (både producenter, lager och användare) erbjuder flexibilitet via stödtjänster till Svenska kraftnät mot ekonomisk kompensation.

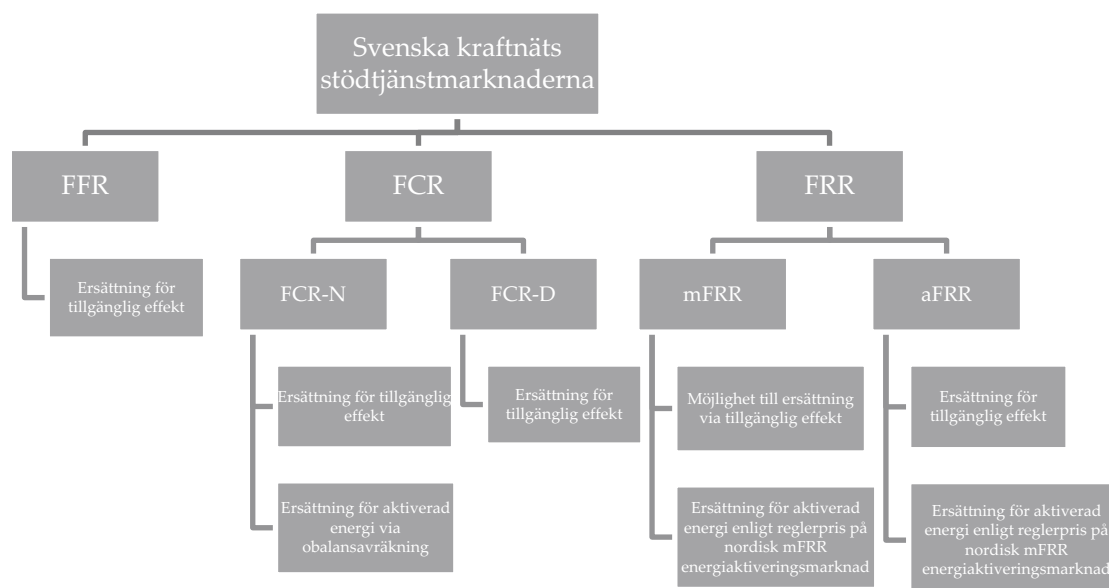
För aktören kan deltagande på någon av de marknader som Svenska kraftnät erbjuder innebära en utökad affärsmodell och intäktskälla, deltagande innebär även ett viktigt bidrag till ett driftsäkert elsystem. Tillräckligt med resurser som kan bidra till den kortsiktiga balanseringen är även en viktig förutsättning i omställningen från ett elsystem med en stor andel planerbara kraftslag till ett elsystem med mer väderberoende och volatila kraftslag.

I nuläget hanterar Svenska kraftnät fem olika stödtjänstmarknader där aktörer med flexibla resurser kan delta och få intäkt för att bidra med kapacitet och/eller energi. Utöver de fem mer kontinuerliga marknaderna så har Svenska kraftnät även ingått längre kontrakt med ett antal aktörer för effektprodukt och störningsprodukt för att hantera risken för oförutsedda större störningar i elsystemet. Denna rapport hanterar inte de längre kontrakten utan fokuserar enbart på de fem stödtjänstmarknaderna.

Stödtjänster för att balansera elsystemet kan delas upp i frekvenshållningsprodukter som används vid normal drift (FCR-N) respektive störd drift (FCR-D) samt frekvensåterställningsprodukterna (aFRR och mFRR). Frekvenshållningsprodukterna har till uppgift att stabilisera frekvensen vid obalanser och frekvensåterställningsprodukterna sedan återställa den till 50 Hz. Utöver produkter för att balansera elsystemet finns även en produkt (FFR) för att hantera större felfall vid tillfällena med låg rotationsenergi i elsystemet denna produkt räknas i denna rapport också in under stödtjänstmarknader.

De fem marknaderna för stödtjänster har olika tekniska krav på de resurser som deltar gällande bland annat uthållighet, budstorlek och aktiveringstid. Marknaderna har även mer eller mindre olika ersättningsmodeller där två av marknaderna endast ger ersättning för tillgänglig kapacitet (FFR och FCR-D), och resterande marknader kan ge ersättning för både tillgänglig kapacitet och aktiverad energi (aFRR, mFRR och FCR-N). Det som frekvenshållnings- och frekvensåterställningsprodukterna har gemensamt är att de upphandlas på timbasis för årets alla timmar. För FFR som är till för tillfällen med låg rotationsenergi finns i dagsläget endast behov under sommarmånaderna (april-oktober) men Svenska kraftnäts prognos är att behovet av FFR kommer att öka i takt med utbyggnad kraftelektronik ansluten produktion så som exempelvis vind och solkraft.

De fem stödtjänstmarknader som Svenska kraftnät hanterar idag ställer olika tekniska krav på deltagande resurser. I Figur 1 ses en schematisk bild över vilken typ av ersättning (effekt/energi) som erhålls per produkt. I Tabell 1 följer en genomgång av de viktigaste kraven per produkt.



Figur 1 Schematisk beskrivning av vad man får ersättning för (effekt/energi) genom deltagande på de olika stödtjänstmarknaderna

Tabell 1: Översikt av tekniska krav vid de olika stödtjänstmarknaderna

	FFR	FCR-N	FCR-D	aFRR	mFRR
Allmänt	Hör till avhjälpande åtgärder och aktiveras vid transienta frekvensfall för att undvika att elsystemet hamnar utanför angivna driftsäkerhetsgränser.	Frekvensrelaterad stödtjänst. Har till uppgift att hantera normala frekvens-variationer i elsystemet	Frekvensrelaterad stödtjänst. Har till uppgift att ta hand om frekvensavvikelser vid störd drift	Frekvensrelaterad stödtjänst. Har till uppgift att avlasta aktiverad FCR-N och FCR-D	Frekvensrelaterad stödtjänst som avlastar de automatiska stödtjänsterna. Används förutom att balansera elsystemet även i första hand för att hantera störningar och överbelastning i transmissionsnätet.
Hur sker aktivering?	Automatiskt vid ett snabbt och transient frekvensfall som typiskt inträffar vid större fel i elsystemet	Automatiskt när frekvensen avviker från 50 Hz	Automatiskt när frekvensen överstiger 50,1 Hz för nedreglering alternativt understiger 49,9 Hz för uppreglering	Automatiskt via aktiveringssignal från Svenska kraftnät	Efter beordrande från Svenska kraftnät
Svenska kraftnäts effektbehov 2022	Upp till 100 MW	230 MW	Upp: 560 MW Ned: 165 MW (Q4 2022)	Upp: 140 MW (fördelat per elområde) Ned: 140 MW (fördelat per elområde)	Uppstart av kapacitetsmarknad 17 okt 2023 med ett mindre definierat volymbehov per elområde.
Svenska kraftnäts volymbehov lång sikt (Swecos bedömning)	Ökande utifrån minskad rotationsenergi i elsystemet	Oförändrat/avtagande efter implementering av förändrad balanseringsmodell	Oförändrat för uppreglering Ökande för nedreglering till en nivå på 540 MW 2025. FCR-D volym bestäms utifrån största möjliga felfall	Oförändrat/ökande vid implementering av förändrad balanseringsmodell där mFRR och aFRR kommer att vara de centrala produkterna för att hantera obalanser i elsystemet	Oförändrat/ökande vid implementering av förändrad balanseringsmodell där mFRR och aFRR kommer att vara de centrala produkterna för att hantera obalanser i elsystemet
Volymbehov per elområde eller sverigenivå	Sverigenivå	Sverigenivå	Sverigenivå	Elområde	Elområde
Vilken typ av reglering har Svenska kraftnät behov av, upp- eller nedreglering?	Endast uppreglering	Symmetrisk produkt. Kontinuerlig reglerförmåga för både upp- och nedreglering krävs vid deltagande	Separat avrop för upp- respektive ned-regleringsresurser	Separat avrop för upp- respektive nedregleringsresurser	Separat avrop för upp- respektive ned-regleringsresurser

	FFR	FCR-N	FCR-D	aFRR	mFRR
När sker avrop	Årlig upphandling av effekt med avrop vid behov 2 ggr per vecka under avtalsperioden	Del av effekt avropas 2 dagar innan driftdygn (D-2) och del av effekt avropas 1 dag innan driftdygn (D-1) efter spotklarering	Del av effekt avropas 2 dagar innan driftdygn (D-2) och del av effekt avropas 1 dag innan driftdygn (D-1) efter spotklarering	Dagliga effektavrop (D-1) innan spotklarering för kommande dags driftdygn	Dagliga effektavrop (D-1) innan spotklarering för kommande dags driftdygn Avrop av energi inom drifttimmen vid behov
Ersättning	Ersättning enligt marginalpris för effekt vid avrop	Ersättning enligt budpris (pay-as-bid) för effekt vid avrop + ersättning för aktiverad energi (reglerpriser)	Ersättning enligt budpris (pay-as-bid) för effekt vid avrop	Ersättning enligt marginalpris för effekt vid avrop + ersättning för aktiverad energi (regler-priser)	Ersättning enligt marginalpris för effekt vid avrop + ersättning enligt marginalpris för aktiverad energi vid avrop
Krav på aktiveringstid vid deltagande	<ul style="list-style-type: none"> • Full aktivering inom 1,3 s vid frekvensfall till 49,7 Hz • Full aktivering inom 1,0 s vid frekvensfall till 49,6 Hz • Full aktivering inom 0,7 s vid frekvensfall till 49,5 Hz 	Automatisk linjär aktivering när frekvensen avviker från 50 Hz och full aktivering inom 180 sekunder när frekvensen avviker med +/- 0,1 Hz från 50 Hz	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisk linjär aktivering inom frekvensintervallet 49,9–49,5 Hz för uppreglering och 50,1–50,5 Hz för nedreglering • 86% av full aktivering inom 7,5 sekunder när frekvensen understiger 49,9 Hz eller överstiger 50,1 Hz 	Automatisk linjär aktivering när frekvensen avviker från 50 Hz och full aktivering inom 300 sekunder (5 minuter)	Full aktivering inom 15 minuter från beordrande
Krav på uthållighet vid deltagande	30 s alternativt 5 s	1 h	20 min	1 h	1 h
Minsta budstorlek	0,1 MW	0,1 MW	0,1 MW	1 MW	5 MW
Teknologier som levererar stödtjänster	Batterier och flexibel förbrukning	Huvudsakligen vattenkraft men även en mindre mängd värmekraft	Huvudsakligen vattenkraft men även energilagring, användbarflexibilitet (upp), värmekraft, solkraft och vindkraft	Vattenkraft, värmekraft och vindkraft	Huvudsakligen vattenkraft men även värmekraft, gasturbiner, användbarflexibilitet och vindkraft för nedreglering

2.1 FFR (Fast Frequency Reserve)

FFR (Fast Frequency Reserve) är en relativt ny produkt och introducerades av Svenska kraftnät sommaren 2020 för att kunna hantera tillfällena med låg rotationsenergi i det nordiska elsystemet. I nuläget uppstår tillfällena med låg rotationsenergi framförallt under sommarmånaderna april-oktober och det är framför allt då som Svenska kraftnät har ett behov av denna produkt. De övergripande tekniska kraven som gäller för att bidra med FFR är en minsta budstorlek om 0,1 MW. Vid aktivering av resursen som sker automatiskt till följd av en större transient frekvensändring är krav på en aktiveringstid om 0,7-1,3 sekunder och vid aktivering krävs sedan en uthållighet på 5-30 sekunder.

2.2 FCR (Frequency Containment Reserve)

FCR (Frequency Containment Reserve) är en automatisk produkt som har till uppgift att motverka en frekvensavvikelse från 50 Hz. Den automatiska aktiveringen sker genom att installerad styrutrustning hos leverantören reagerar på en frekvensförändring i elnätet. FCR är uppdelad i två marknader FCR-N och FCR-D vars tekniska kravställning gör att den aktiveras vid olika stor frekvensavvikelse.

2.2.1 FCR-N (Frequency Containment Reserve – Normal)

FCR-N aktiveras vid frekvensförändringar inom normalbandet 50,1 Hz – 49,9 Hz. FCR-N är en symmetrisk produkt vilket gör att de resurser som blir avropade måste kunna regleras symmetriskt runt en frekvensavvikelse från 50 Hz, d.v.s. både upp och ned. I dagsläget levereras denna produkt nästan till 100 % från vattenkraft, med undantag för en mindre andel förkvalificerad värmekraft, energilagring, flexibel förbrukning och vindkraft. De övergripande tekniska kraven för att bidra med FCR-N är en minsta budstorlek om 0,1 MW. Vid aktivering av resursen, som sker automatiskt när frekvensen avviker från 50 Hz, är krav om full aktiveringstid 100 % inom 3 minuter. Uthållighetkrav för produkten vid aktivering är 60 minuter.

2.2.2 FCR-D (Frequency Containment Reserve – Distributed)

FCR-D aktiveras automatiskt när frekvensen går utanför normalspannen, det vill säga över 50,1 Hz eller under 49,9 Hz och aktivering ska ske linjärt. FCR-D består av två produkter, en produkt för nedreglering och en produkt för uppreglering. FCR-D produkten för nedreglering infördes så sent som i januari 2022 och är ett resultat av att de nordiska stamnätsoperatörerna sett ett behov av att även klara av driftstörningar i elsystemet som medför överfrekvenser (t.ex. vid bortkoppling av stora utlandskablar vid export). De övergripande tekniska kraven för att bidra med FCR-D uppreglering och nedreglering är en minsta budstorlek om 0,1 MW. Vid aktivering av resursen är det krav om 86% aktivering inom 7,5 sekunder om frekvensen sjunker ned till 49,5 Hz respektive ökar till 50,5 Hz. Uthållighetkrav för produkten vid aktivering är 20 minuter.

2.3 FRR (Frequency Restoration Reserve)

När det gäller båda produkterna inom FRR så tillgodoses behovet idag till största del av vattenkraft, men på senare år har det tillkommit en mindre leverans även från värmekraft, vindkraft, solkraft och flexibel förbrukning. För att delta på marknaderna för aFRR och mFRR krävs längre uthållighet och mer kontinuerlig möjlighet till reglering jämfört med FFR och FCR-D. För aFRR krävs även ytterligare investering i säker IT/kommunikation med Svenska kraftnät där det ska vara möjligt att mottaga aktiveringssignal och återrapportera status från/till Svenska kraftnäts SCADA system.

2.3.1 aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve)

aFRR är en automatisk produkt framtagen för att avlasta FCR-marknaderna och har till uppgift att återställa frekvensen till 50 Hz. Den automatiska aktiveringen sker genom att en styrsignal skickas från Svenska kraftnät till avropade leverantörer om hur stor volym som ska aktiveras vid en given frekvensavvikelse. Minsta budstorlek för aFRR är 1 MW, krav på aktiveringstid är 100 % inom 5 minuter och uthållighetskrav idag är 60 minuter.

2.3.2 mFRR (manual Frequency Restoration Reserve)

mFRR, är en manuell frekvensåterställningsprodukt vars syftet är att avlasta de övriga produkterna (FCR och aFRR). Att produkten är manuell innebär att den aktiveras först om Svenska kraftnät ger order om att den ska aktiveras. mFRR-bud avropas kontinuerligt vid behov. När resursen blir avropad behöver den vara fullt aktiverad inom 15 minuter och uthållighetskrav för produkten är 60 minuter. Minsta budstorlek för denna produkt är idag 5 MW.

3 Pågående utveckling av stödtjänstermarknaderna

Alla befintliga stödtjänstermarknaderna genomgår just nu utveckling för att möta framtidens behov och för ett mer effektivt utnyttjande och uppköp av de resurser som behövs för att balansera elsystemet. Den pågående utvecklingen påverkar både de aktörer som just nu deltar på någon marknad och de aktörer som funderar på att gå in på en eller flera marknader. För samtliga aktörer är det bra att känna till de förändringar som är på gång och när i tid ändringar kan komma att träda i kraft. Tabell 2 visar de viktigaste kommande regelförändringar för stödtjänstermarknader.

Tabell 2: Kommande regelförändringar för stödtjänstmarknader

Regelförändring	Införande	Effekter på marknaden
Nya tekniska krav FCR	2023	• Minskad möjlighet för befintlig vattenkraft att delta
Nationell mFRR kapacitetsmarknad	2023	• Ersättning för att bidra med tillgänglig effekt • Uppköp av mFRR effekt per elområde • Prissättning av effekt per elområde • Definierat volymbehov per elområde
		•
Nordisk mFRR kapacitetsmarknad	2024	• Ökad konkurrens
Leverantör av stödtjänster (BSP) -ny roll införs	2024	• Ej behov av att gå via balansansvarig part för att leverera stödtjänster till Svenska kraftnät (gäller FCR och FRR)
Marginalprissättning FCR	2024	• Ökad konkurrens och ökad transparens
Förändrad nordisk mFRR energiaktiveringsmarknad (mFRR EAM)	2025	• Sänkning av minsta budstorlek till 1 MW • Uthållighetskrav om 15 min (i stället för dagens 1 h) • Sänkt krav på aktiveringstid till 12,5 min
Europeisk mFRR energiaktiveringsmarknad	2026	• Ökad konkurrens
Europeisk aFRR energiaktiveringsmarknad	2026	• Ökad konkurrens • Aktivering utifrån obalanser per elområde • Separat prissättning av aFRR energi utifrån avrop enligt budkurva

3.1 FCR

Den 1 september 2023 implementeras nya tekniska krav för FCR. Implementering av de nya tekniska kraven kommer att införas stegvis under en 5 års period där nya aktörer som vill delta på FCR marknaderna kommer att behöva förkvalificera sina resurser enligt de nya kraven och befintliga aktörer som idag redan deltar kommer att vid omkvalificering behöva anpassa sig till de nya tekniska kraven för att fortsatt kunna delta.

3.2 mFRR kapacitetsmarknad

I oktober 2023 infördes en nationell kapacitetsmarknad för mFRR och målet är att under 2024 utöka den till en nordisk marknad. Kapacitetsmarknaden ska säkerställa att det finns tillräcklig effekt per elområde för att balansera elsystemet även när flaskhalsar från norr till söder uppstår. Den nya marknaden innebär att Svenska kraftnät dagligen, dagen före driftdygnet, per elområde och per timme upphandlar en på förhand specificerad volym mFRR effekt, för att i nästa steg säkerställa tillräckligt mFRR-volym för energiaktivering vid behov under drifttimmen. De mFRR resurser som blir avropade på kapacitetsmarknaden kommer få ersättning för avropad effekt enligt marginalpris och förbinder sig att lägga in motsvarande effekt som bud på mFRR energiaktiveringsmarknaden (den nordiska reglerkraftmarknaden). Vid avrop på energiaktiveringsmarknaden utgår

ersättning för aktiverad energi enligt det reglerpris som gäller för den aktuella timmen.

Att det har introducerats en ersättning för tillgänglig mFRR-effekt är en positiv förändring för mer planerbar produktion då intäktströmmen blir mer förutsägbar jämfört om en resurs enbart deltar på energiaktiveringsmarknaden för mFRR.

3.3 mFRR EAM (Förändrad nordisk energiaktiveringsmarknad)

Idag har den nordiska mFRR energiaktiveringsmarknad en tidsupplösning på timnivå och de resurser som deltar på marknaden behöver därmed uppfylla det tekniska kravet på en uthållighet om 60 minuter. En förändring som är på gång är övergången från en 60 minuters marknad till en 15 minuters marknad. Denna förändring kommer att minska kravet på uthållighet hos de resurser som deltar från 60 minuter till 15 minuter och vid övergången kommer även minsta budkrav att sänkas från dagens 5 MW till 1 MW. Dessa två större förändringar kommer att underlätta för nya teknologier med begränsad uthållighet att delta på marknaden och det är sannolikt att konkurrensen på marknaden ökar.

4 Balansering genom flexibel elanvändning vid produktion av vätgas

På sikt väntas vätgasproduktion från elektrolys utgöra stor del av elanvändningen. Detta innebär stora utmaningar för elsystemet i form behov av tillräckligt med elproduktion och elnät. Ett sätt att lösa den utmaningen kan vara elektrolysörernas förmåga till flexibilitet vilket dock förutsätter att efterföljande processer är utformade för att klara den flexibiliteten i form av lagermöjlighet och eller flexibel huvudprocess där vätgasen nyttjas.

4.1 Teknisk förmåga

Inom ramen för arbetspaketet undersöks förutsättningarna för tre olika typer av elektrolysörer: PEM (Proton Exchange Membrane), Alkaliska elektrolysörer och SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cell). En sammanställning av de olika alternativens tekniska egenskaper visas i Tabell 3.

Tabell 3: Tekniska egenskaper hos olika elektrolysörer

	PEM	Alkaliska	SOEC
Ramphastighet – hur snabb kan elektrolysören aktiveras från stand-by läge (%/sekund)	Ca 10 sek för full rampning (+/- 10 %/sekund) ¹	Ca 1 minut (0,1–1 % per sekund) Det finns dock alkaliska elektrolysörer som klarar av lika snabb rampning som PEM, upp till 20 % per sekund. Tillverkarna kan anpassa kontrollsystem för att klara snabbare rampning. ²	Ca 1 minut
Kallstart	5-10 min	40 – 120 min	> 600 min
Kostnadsbild ³	11 000 – 18 000 kr/kW Fortfarande den dyraste tekniken av de som finns på marknaden, men priset förväntas sjunka i takt med att tekniken kommersialiseras.	5 000 – 14 000 kr/kW	28 000 – 56 000 kr/kW Då tekniken inte finns på marknaden kommer priset att minska i framtiden.
Risker med tekniken	Användning av sällsynta jordartsmetaller	Kaliumhydroxid eller natriumhydroxid måste hanteras.	Tekniken inte mogen
Typstorlek anläggning (MW) ⁴	10	20	10
Uthållighet vid reglering	Enbart beroende av lagerstorlek	Enbart beroende av lagerstorlek.	Enbart beroende av lagerstorlek

¹ Om elektrolysören är avstängd tar det exempelvis för en av dagens etablerade produkter cirka 1 minut att starta upp varefter given aktiveringstid gäller.

² (IRENA, 2020)

³ Varierar stort beroende på storlek och förutsättningar. Siffror tagna från IEA.

⁴ Finns ett stort spann beroende på tillämpning och tidsperspektiv. Det finns redan idag en 75 MW alkalisk elektrolysör vid Kwinana Energy Hub, Australien.

	PEM	Alkaliska	SOEC
Lämplighet för reglering	PEM har den snabbaste ramptiden och är den mest flexibla av de tre elektrolysörerna. Tekniken eller verkningsgraden påverkas inte på sikt av flexibel produktion. Däremot påverkas verkningsgraden av dess belastning, där optimal drift är ca 65 % belastning.	Alkaliska elektrolysörer driftas fördelaktigt under stabila förhållanden, det vill säga inte under förutsättningar med reglering. Anledningen är att den kemiska balansen rubbas vid rampning och således försämras verkningsgraden vid varje drastisk ändring. Stora system (>100 MW) klarar stödtjänster bra då en mindre andel av kapaciteten (moduler) kan regleras utan problem.	För SOEC gäller liknande förutsättningar som för alkaliska elektrolysörer, tekniken körs bäst under stabila förhållanden utan upp- eller nedreglering. Tekniken kräver också mycket höga temperaturer vilket försvårar reglering.

Det billigaste elektrolysör alternativet utgörs idag av alkaliska elektrolysörer.

De är även dessa som är vanligast förekommande idag. Alkaliska elektrolysörer är dock mindre trycksatta jämfört med PEM, vilket kan öka kostnaden vid extra komprimering. PEM medför dock skalfördelar jämfört med alkaliska elektrolysörer, vilket kan bidra till att sänka kostnadsbilden på sikt och kan göra PEM konkurrenskraftig gentemot alkaliska elektrolysörer. SOEC finns ännu inte på marknaden och mognadsgraden är fortfarande låg, men utvecklingen pågår. När mognadsgraden ökar och tekniken blir tillgänglig på marknaden väntas priset att sjunka tack vare skalfördelar även här och fler leverantörer som erbjuder SOEC.

En typisk anläggningsstorlek för elektrolysörer varierar väldigt mycket beroende på användningsområde. Gällande nuvarande elektrolysörsanläggningar är de större anläggningar i storleksordningen 10 MW. Världens största installerade PEM-elektrolysör är på 20 MW i Bécancour, Kanada och ägs av Air Liquide.⁵ I Kwinana, Australien bygger BP en vätgashub med stöd från regeringen för att producera vätgas och ammoniak och en elektrolysör om minst 75 MW kommer att installera.⁶ I Sverige planeras elektrolysöranläggningar på över 100 MW, bland annat för stålproduktion. Hybrit och H2 Green Steel planerar för 500 MW respektive 700-800 MW.

Den tekniktyp som bedöms som mest lämpad för kortsiktig balansering via stödtjänstmarknaderna är PEM. Oavsett teknik så påverkas alla elektrolysörer negativt av mycket regleringar. Det krävs mer underhåll och medför en risk att förkorta livslängden dock påverkas PEM i mycket mindre utsträckning negativt av reglering jämför med övriga typer. Att reglera effekten på en PEM-elektrolysör försämrar inte livslängden eller prestandan i särskilt stor utsträckning, däremot ändras verkningsgraden när elektrolysören inte opererar vid optimal belastning

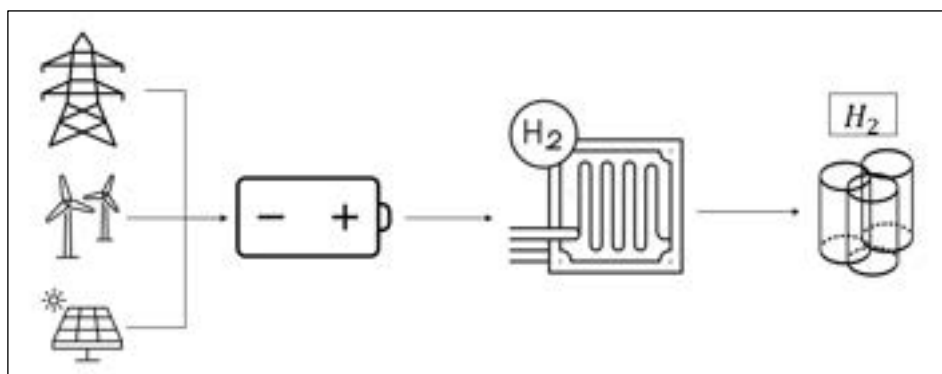
⁵ Air Liquide, 2021

⁶ (BP, 2022)

(runt 65 %). Vid reglering av alkaliska elektrolysörer och SOEC påverkas den kemiska balansen i systemet vilket har negativ inverkan på livslängden. Laständringar leder till förändringar i temperaturen vilket också gör att den väldigt basiska elektrolyten (NaOH eller KOH) ger en ökad korrosion.⁷

Att PEM påverkas negativt i lägre utsträckning plus att PEM innehar förmåga till snabb upprampningstid gör den mest lämplig för deltagande på stödtjänstmarknaderna

En lösning för att reducera den negativa effekten som reglering har på elektrolysörerna är att "skydda" elektrolysören genom att sammankoppla den med ett batteri eller en superkondensator mellan elproduktion/el nät och elektrolysören som hanterar snabba laständringar, se Figur 2. **Fe! Hittar inte referenskälla..** En leverantör som intervjuats i arbetet med denna rapport nämner att de tittat närmare på är att kombinera PEM med alkaliska elektrolysörer i ett system med 50% av var teknik.⁸ Anledning är att få ut mesta möjliga av de två teknikerna: PEM-elektrolysören kan ta hand om den snabba första upp/ ned regleringen och den alkaliska elektrolysören drifas kontinuerligt och står för elektrolysörsystemets basproduktion.



Figur 2: Systemskiss för elektrolysörsanläggningar. Från vänster: Elproduktion, batteri, elektrolysör och lagring.

Tabell 4 visar en sammanställning av de tekniska krav för stödtjänstprodukterna som anses ha störst påverkan på elektrolysörens tekniska förmåga att delta på marknaderna. De tekniska förutsättningarna för PEM att delta bedöms generellt sett som goda, även om kravet om en mycket kort aktiveringstid kan göra det utmanande att delta på FFR.

När det gäller alkaliska och SOEC elektrolysörer så ur ett tekniskt kravperspektiv så är det möjligt med bidrag till den kortsiktiga balanseringen men som beskrivs tidigare lämpar sig inte dessa typer i generella termer för den kortsiktiga reglering eftersom regleringar sliter för mycket på elektrolysören. Det finns dock möjlighet att använda även alkaliska och SOEC för den kortsiktiga balanseringen men då krävs att tekniken kombineras med en kraftelektronik lösning exempelvis ett batteri som kan ta hand om den första snabbare reglersekvensen och sedan att elektrolysören kan ta över och stå för den kontinuerliga uthålligheten. Alternativt

⁷ (RISE, 2021)

⁸ Intervju med NEL, 2023

att PEM och alkaliska/SOEC kombineras i ett gemensamt system för att dra fördel av de olika elektrolysortypernas fördelar.

Tabell 4: Elektrolysortypernas möjligheter att uppfylla tekniska krav på de olika stödtjänstmarknaderna

Stödtjänst	Stödtjänstens tekniska krav idag	PEMs tekniska förmåga att delta	Alkaliska och SOECs tekniska förmåga att delta
FFR	Budstorlek: 0,1 MW Aktiveringstid: 0,7–1,3 sekunder Uthållighet: 5-10 sekunder	Ok Krav på aktiveringstid för kort men i kombination med exempelvis batteri som står för snabbheten kan deltagande vara möjligt	Krav på aktiveringstid för kort men i kombination med exempelvis batteri som står för snabbheten kan deltagande vara möjligt Ej lämpligt med deltagande eftersom alkaliska och SOEC lämpar sig bäst för mer kontinuerlig drift
aFRR upp	Budstorlek: 1 MW Aktiveringstid: 300 sekunder Uthållighet: 60 minuter	Kan vara utmanande för elektrolysörer mindre än 3 MW att delta Ok Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess	Ej lämplig för deltagande eftersom deltagande kräver kontinuerlig justering av reglerbidraget när frekvensen är skild från 50 Hz
aFRR ned	Budstorlek: 1 MW Aktiveringstid: 300 sekunder (5 minuter) Uthållighet: 60 minuter	Kan vara utmanande för elektrolysörer mindre än 3 MW att delta Förutsatt varmstart möjligt att uppfylla krav på aktiveringstid Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess	Ej lämplig för deltagande eftersom deltagande kräver kontinuerlig justering av reglerbidraget när frekvensen är skild från 50 Hz
FCR-N	Budstorlek: 0,1 MW Aktiveringstid: 180 sekunder Uthållighet: 60 minuter	Ok Ok Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess	Ej lämplig för deltagande eftersom deltagande kräver kontinuerlig justering av reglerbidraget när frekvensen är skild från 50 Hz
FCRD-upp	Budstorlek: 0,1 MW Aktiveringstid: 30 sekunder Uthållighet: 20 minuter	Ok Förutsatt varmstart möjligt att uppfylla krav på aktiveringstid Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess	Ej lämplig för deltagande eftersom deltagande kräver kontinuerlig justering av reglerbidraget när frekvensen är lägre än 49,9 Hz
FCRD-ned	Budstorlek: 0,1 MW Aktiveringstid: 30 sekunder Uthållighet: 20 minuter	Ok Förutsatt varmstart möjligt att uppfylla krav på aktiveringstid Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess	Ej lämplig för deltagande eftersom deltagande kräver kontinuerlig justering av reglerbidraget när frekvensen är högre än 50,1 Hz
mFRR upp	Budstorlek: 5 MW Aktiveringstid: 15 minuter Uthållighet: 60 minuter	Ok Ok Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess	Kan vara utmanande för elektrolysörer mindre än 3 MW att delta Ok Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess
mFRR ned	Budstorlek: 5 MW Aktiveringstid: 15 minuter Uthållighet: 60 minuter	Ok Ok Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess	Kan vara utmanande för elektrolysörer mindre än 3 MW att delta Ok Beroende på lagerstorlek/vätgasbuffert för huvudprocess

När det gäller de tekniska krav som tas upp i tabellen ovan så kan generellt sägas att lägre krav på minsta budstorlek är en fördel för alla typer av teknologier med med en lägre installerad effekt. Ofta ges inte full installerad effekt som bud på marknaderna utan det är en delmängd som kan undan varas för deltagande.

För elektrolysörer som vill delta med uppregleringsbud krävs att elanvändningen kan minskas och om då installerad effekt ska kunna ges som bud på någon marknad måste elektrolysören i sin grundproduktion producera vätgas på maxkapacitet och vara beredd att helt stänga av elektrolysören. Att producera på max och att vara beredd att helt stänga av vätgasproduktion bedöms ej som ett realistiskt beteende. Omvänt gäller att om elektrolysören vill delta på nedreglering krävs att elanvändningen kan ökas och inte heller här bedöms det som ett realistiskt och inte ens möjligt (med tanke på krav om aktiveringstid) scenario att elektrolysören är avstängd och är beredd på att gå upp i full produktion av vätgas. Det realistiska är att om elektrolysörer deltar på någon av marknaderna så är det alltid med en mindre delmängd.

Ett annat krav som påverkar elektrolysören tekniska förmåga att delta är hur snabba elektrolysören måste öka minska som vätgasproduktion vid aktivering på någon av marknaderna och där görs bedömningen att alla marknader är möjliga att delta på förutom FFR som har ett alldeles för snabbt krav på aktivering.

Krav om uthållighet kopplar för elektrolysörer till bedömningen om huruvida den huvudprocess som elektrolysören förser med vätgas kan avstå från vätgas alternativt om det finns ett vätgaslager att nyttja. FCRD marknaderna har ett lägre krav om uthållighet om bedöms därmed som mer troliga för elektrolysörer vara intresserade av. De stödtjänster som anses vara bäst lämpade för elektrolysörer (med dagens förutsättningar på marknaden) är FCR-D. Att delta på FCR-N och FRR-marknaderna kräver en mer konstant energiaktivering vilket i sin tur medför större kapacitetsbehov för flexibilitet i vätgasanläggningen och högre kostnader.

4.2 Ekonomiska förutsättningar

För att bidra med nedreglering krävs det utrymme för att öka anläggningens produktion av vätgas. Med andra ord förutsätter det att det finns marginal kvar för att ökad vätgasframställning och att det antingen fångas upp av ett lager eller efterfrågas av den process som vätgasen framställs för. Om framställningssyftet är att använda vätgas i en industriprocess är sannolikheten stor att industritillverkningen är överordnat balansering av elnätet. Detta eftersom vätgas då blir en del i en större tillverkningsprocess där ekonomiska aspekter till viss del är avgörande men där andra aspekter spelar in, exempelvis leveransgaranti mot kunder. Däremot om det inte råder hög efterfrågan eller om det finns ett anslutande vätgaslager eller om lagret kan finnas i distributionen, i kombination med ekonomiska incitament kan det finnas förutsättningar för att bidra med nedreglering. En annan avgörande parameter är elpriset. Om det råder höga elpriser och anläggningen därför inte utnyttjas till full kapacitet uppstår marginal för ökad produktion förutsatt att intäktsmöjligheten på stödtjänstmarknaden täcker den extra produktionskostnaden. Alternativt kan elektrolysörernas kapacitet överdimensioneras i förhållande till industrins vätgasbehov och på så vis skapas det marginal för deltagande med nedregleringsprodukter. En

överdimensionering av elektrolysören och /eller lager medför dock ökade investeringskostnader och alternativet behöver därför vara ekonomiskt försvarbart, vilket med pågående utvecklingsomfattning på stödtjänstmarknaderna kan vara svårt att garantera vid investeringstillfället.

Vid deltagande med uppregeringsprodukter krävs i stället minskad elanvändning och således minskad vätgasproduktion. Precis som för nedreglering beror det både på tekniska och marknadsmässiga förutsättningar. Även här gäller att om vätgasframställningen är för en industriprocess så kommer den sannolikt vara överordnad balansering av elnätet. Om industriprocessen kräver kontinuerlig tillförsel av vätgas krävs här ett vätgaslager för att förse processen med vätgas om elektrolysören regleras ned. Om vätgasproduktionen stryps och det inte finns någon buffert av framställd vätgas eller om den industriella processen är uppdelad och har mellanlager kan det påverka industriprocessen negativt.

5 Balansering genom produktion av el från vätgas

Utöver flexibilitet i elektrolysörer utreds i detta arbetspaket även hur kortsiktig balansering kan ske med hjälp av elproduktion från vätgas genom användandet av vätgasturbiner alternativt bränsleceller.

5.1 Teknisk förmåga Gasturbiner och bränsleceller

När det gäller användning av vätgas så tar detta avsnitt upp den tekniska förmågan till kortsiktig balansering hos vätgasdrivna gasturbiner och bränsleceller. Vilka möjligheter och begränsningar som finns med olika typer av gasturbiner och bränsleceller samt vilken typ som kan passa bäst för den kortsiktiga balanseringen.

Det finns idag inga gasturbiner som kan drivas med enbart vätgas, men allt tyder på att det kommer inom en mycket snar framtid. Exempelvis så satsar Siemens Energy i Finspång på att erbjuda vätgasdrivna gasturbiner på marknaden inom tidsperioden 2025-2030 och inom koncernen har det redan genomförts lyckade tester med 100% vätgasdrift i en komplett gasturbin. Vätgas kan däremot idag blandas in i bränslet utan någon större behov av modifikation av befintliga gasturbiner. Däremot att använda uteslutande vätgas i en befintlig gasturbin kräver att designen ändras på grund av vätgasens förbränningsegenskaper och att materialen som används är motståndskraftiga mot väteförspädning. Utan anpassningar riskerar komponenter att skadas.

Även om gasturbiner med enbart vätgasdrift inte levereras idag är uppskattningen att priserna inte kommer att skiljas sig enormt från de fossildrivna gasturbinerna. Uppskattningsvis tillkommer 15 % av CAPEX för att hantera vätgasens annorlunda förbränningsprofil. Det är också möjligt att modifiera existerande gasturbiners förbrännare vilket uppskattas kosta 25 % av CAPEX. Övriga tekniska egenskaper för olika typer av gasturbiner presenteras i Tabell 5.

Då vätgasdrift i gasturbiner är i ett tidigt utvecklingsstadium finns potential för förbättringar av driften så som ett större lastomfång med lägre lägsta last pga

vätgasens stabila förbränningsegenskaper. Beroende på utveckling kan därmed fler delar av stödtjänstemarknaden bli aktuell i framtiden för vätgasdrivna gasturbiner, utöver där fossildrivna gasturbiner idag redan deltar, speciellt i sektorkopplade system med el- och värmeproduktion vid sidan av stödtjänsterna.

Tabell 5: Tekniska egenskaper för olika typer av gasturbiner

Gasturbiner	Gasturbin (Simple cycle)	Gaskombiverk (Combined cycle)
Ramphastighet – hur snabbt kan gasturbinen aktiveras (MW/minut)	7 – 15 % / minut. 6 MW / minut	10 % / minut 6 MW / minut
Minsta last ⁹	30–50 % av full last	40–60 % av full last
Kostnadsbild	4270 kr/kW för fossildrivna gasturbiner. 15 % förväntad kostnadsökning för nyttillverkade vätgasturbiner. 25 % av CAPEX för att uppgradera befintlig gasturbin för vätgasdrift.	8000 kr/kW för fossildrivna gasturbiner. Samma kostnadsökning för att anpassa till vätgasdrift. Gaskombiverket kombinerar en gasturbin och en ångturbin för att höja verkningsgraden från samma mängd bränsle.
Varmstart	10 – 30 min	30 – 70 min
Kallstart	3 – 4 h	6 – 8 h
Risker med tekniken	Snabb reglering leder till ett något högre slitage på rotorbladen vilka kan behöva bytas oftare, en högre underhållskostnad. Men det är ingen väsentlig kostnad sett till helheten. Utan anpassningar kommer en för hög mängd vätgas riskera att skada komponenter i turbinen och orsaka driftstopp	Samma som vid enbart gasturbin
Uthållighet vid reglering	Enbart beroende av tillgänglig mängd vätgas	Enbart beroende av tillgänglig mängd vätgas
Lämplighet för reglering	Gasturbiner används redan idag i störningsprodukten för Svk. Aktivering sker snabbt vilket inte heller skadar gasturbinen. En något högre kostnad för underhåll uppstår vid snabb reglering, men det är ingen drastisk skillnad. Dagens gasturbiner drivs av naturgas, men vätgasdrivna turbiner fungerar på samma sätt.	Gasturbiner används redan idag i störningsprodukten för Svk. Aktivering sker snabbt vilket inte heller skadar gasturbinen. En något högre kostnad för underhåll uppstår vid snabb reglering, men det är ingen drastisk skillnad. Dagens gasturbiner drivs av naturgas, men vätgasdrivna turbiner fungerar på samma sätt

⁹ Vätgasens förbränningsegenskaper öppnar möjligen upp för ett större körfönster och minlast kan i så fall sänkas jämfört med dagens fossildrivna gasturbiner

De vätgasbaserade bränslecellerna som har studerats närmare i detta arbetspaket är PEM och alkaliska. Den typiska anläggningsstorleken varierar beroende på applikation men de vanligaste storlekarna är idag i storleksordning 100 kW och använts främst inom transporter och portabel energi, det finns dock också stationära bränsleceller på flera MW. Den svenska tillverkaren Powercell erbjuder PEM-system på 2–3 MW för marina applikationer.

Livslängden för bränsleceller är för applikation i bilar runt 5 000 timmar, medan stationära applikationer kan ha åtminstone 40 000 timmar. Däremot mår ingen av bränslecellstyperna bra av för mycket reglering, snabba regleringar och kallstarter degraderar bränslecellen eftersom det sliter på membranet och andra delar inom bränslecellen.

Tabell 6 Tekniska egenskaper olika typer av bränsleceller

Bränsleceller	PEM	Alkalisk
Ramphastighet – hur snabb kan bränslecellen aktiveras (%/sek) ¹⁰	Ca 10 sek för full rampning (+/- 10 %/ sekund)	Ca 10 sek för full rampning (+/- 10 %/ sekund)
Typstorlek anläggning (MW)	100 kW – 1 MW	100 kW – 1 MW
Kostnadsbild	1 500 – 20 000 kr/kW	1 000 – 20 000 kr/kW
	Starkt beroende av produktionsvolym. Prognoser visar möjliga priser på 500 kr/kW vid 100 000 producerade enheter per år. Billigaste priset är för applicering i vätgasbilar dyrare för större applikationer	
Starttid	~ 1 sekund	~ 1 sekund
Risker med tekniken	Hög användning av dyra sällsynta jordartsmetaller. Kräver noggrann balansering mellan temperatur och luftfuktighet vilket påverkas vid uppstart och nedstängning.	Känslig mot CO ₂ i luften och bränslet vilket kan skada bränslecellen. Kaliumhydroxid eller natriumhydroxid måste hanteras.
Uthållighet vid reglering	Enbart beroende av tillgänglig mängd vätgas	Enbart beroende av tillgänglig mängd vätgas

¹⁰ Om bränslecellen är i gång eller i standby-läge.

Bränsleceller	PEM	Alkalisk
Lämplighet för reglering	Bra lämpad för reglering. Bränslecellen påverkas inte signifikativt av snabba regleringar och den klarar av snabba förändringar. Livslängden påverkas negativt av uppstart och nedstängning, men det är inte en av de viktigaste parametrarna för livslängden. Andra faktorer är mer avgörande.	

Det finns idag också ett flertal högttemperatur-bränsleceller som varit lyckade gällande stationära applikationer. Solid oxide (SOFC), Molten carbonate (MCFC) och Phosphoric acid (PAFC) har installerats med högre effekter och har bevisats ha en lång livslängd upp mot 80 000 timmar. MCFC och SOFC har en temperatur över 500 grader vilket även genererar värdefull värme. En fördel med dessa teknologier är även att de kan köras på olika bränslen, där naturgas och biogas kan reformeras i bränslecellen. Dessa tekniker är däremot sämre anpassade för kortsiktig balansering eftersom de har långsam responstid och uppstartsprocess, och har därför inte undersökts vidare i detta arbetspaket.

6 Vätgasens roll för den kortsiktiga balanseringen

De tekniska möjligheterna för vätgasteknologier kan generellt sett anses goda, både för elektrolyssidan (åtminstone PEM) och produktionssidan (gasturbiner och bränsleceller). Avgörandet för dess framtida roll i den kortsiktiga balanseringen ligger huvudsakligen i ekonomiska förutsättningarna och konkurrensen med andra typer av teknologier som idag deltar eller planerar att i framtiden delta på marknaderna. I denna studie är fokus de befintliga stödtjänsterna FFR, FCR och FRR men beroende på hur vätgasteknologier framöver kopplas in till elnätet kan en ytterligare nytta vara bidrag till spänningsreglering och reaktiv effekterreglering.

Historiskt sett och än idag är vattenkraften den dominerade resursen för kortsiktig balansering men på senare år har det tillkommit flera nya typer av tekniker. I Tabell 7 visas sammanställning av förkvalificerade resurser per teknologi. De senaste åren har både vind, sol, energilager i form av batterier, värmekraft och flexibel förbrukning tillkommit på Svenska kraftnäts stödtjänstmarknader. Ser man framåt så är det troligt att ökningen av nya teknisklag kommer att fortsätta. Framför allt vind, sol, batterilager och flexibel förbrukning ses idag ha ett stort intresse för av att delta och generera en extra intäktström på stödtjänstmarknaderna.

Tabell 7: Förkvalificerade volymer per 1 oktober 2023 (inom parantes volym per 1 april 2023). Källa: Svenska kraftnät

Teknologi	FFR	FCR-N	FCR-D upp	FCR-D ned	aFRR upp	aFRR ned	mFRR upp	mFRR ned
Vattenkraft	0	1630 (1910)	2620 (2 410)	1140 (1 030)	1 800	1 800	6 110	5 260
Värmekraft	0	40	40	20	50	50	280	260
Energilager ¹¹	50	10	10	50 (<10)	0	0	0	0
Flexibel förbrukning	100	<10	390 (180)	<10	0	0	190	160
Gasturbin	0	0	0	0	0	0	160	90
Solkraft	0	0	0	10	0	0	0	0
Vindkraft	0	150	170	320	0	200 (250)	20	1 440
Kombination vattenkraft + batteri	0	<10	<10 (0)	10	0	0	0	0
Totalt förkvalificerat	150	ca 1930 (2 130)	3240 (2 810)	ca 1560 (1 410)	1 850	2 050 (2100)	6 760	7 210
Svks volymbehov idag	ca 100	231	558	Ökande 558 år 2025	111	111	-	-
Bedömning av Svks volymbehov framöver	Ökande	Oförändrat/ minskande	Oförändrat	Ökande fram till 2025	Ökande per elområde	Ökande per elområde	Ökande per elområde	Ökande per elområde

Vattenkraften är idag den dominerade resursen för deltagande på alla stödtjänstmarknaden förutom FFR. Vattenkraften är en mycket flexibel resurs med lång historisk vana att bidra till reglering av elsystemet. Vattenkraftens flexibilitet och reglerförmåga lämpar sig särskilt bra för kontinuerlig reglering och de produkter där reglerbidraget justeras utifrån frekvensförändringen så som FCR-N och aFRR. Även för mFRR passar vattenkraften bra där reglerad energi oftast är större och uthållighetskravet är längre. Den största delen av vattenkraften är geografiskt placerad i norra Sverige, i elområde 1 och elområde 2. I takt med energiomställningen ökar dock behovet av att det även finns reglerresurser för aFRR och mFRR tillgängliga i södra delarna av Sverige, i elområde 3 och elområde 4, vilket ökar möjligheterna för nya aktörer som är intresserade av dessa två marknader att bidra utan att fullt ut behöva konkurrera med vattenkraften som geografiskt till största delen är placerad i SE1 och SE2.

Aktörer med **batterilager** har de senaste åren fått upp ögonen för de snabbare stödtjänstprodukterna FFR och FCR-D där prisnivåerna har varit och fortsatt är höga. Batteriers tekniska egenskaper lämpar sig särskilt bra för de snabbare produkterna där reglerad energivolym är låg i förhållande behovet av att effekt finns tillgänglig/redo för aktivering. Vätgasteknologier som via sin

¹¹ Avser i nuläget batterier i Svks redovisning

kraftelektronikanslutning mycket väl kan delta på FCR-D kommer att behöva konkurrera med batterilager på dessa marknader framöver.

Värmekraft har på senare år tillkommit som resurser på stödtjänstmarknaderna och deltar framför allt på mFRR eftersom långsammare reglering generellt sett passar kraftvärmens tekniska egenskaper bättre. Det är dock även möjligt för viss värmekraft att reglera snabbare och även delta med både FCR- N och FCR-D samt aFRR. Större delen av värmekraften är geografiskt placerad i södra delarna av Sverige och för vätgasteknologier som tänker sig deltagande på aFRR men framför allt mFRR kommer behöva konkurrera med värmekraft i dessa elområden.

Flexibel förbrukning deltar idag både med de snabbare produkterna FFR och FCR-D men även med den långsammare produkten mFRR. Flexibel förbrukning är likt vätgasteknologierna ansluten till elnätet via kraftelektronik vilket gör att dess reglerförmåga till stor del kan anpassas till de tekniska kraven som gäller för de olika produkterna. Elektrolysörer skulle vid deltagande på stödtjänstmarknaderna också tillhöra kraftslaget flexibel förbrukning och dessa konkurrenskrafter gentemot annan flexibel förbrukning skulle således avgöras av kostnader för bränsle, lagerstorlek/buffert och kostnad för justering i den process som påverkas av flexibilitetsbidraget.

Idag finns deltagande från **gasturbiner** på marknaden för mFRR. Även vätgaseldade gasturbiner skulle med sin tekniska förmåga till aktivering och uthållighet passa bra in på marknaden för mFRR.

Solkraft kan leverera stödtjänster framför allt sommartid men lämpar sig mindre bra vintertid då solinstrålningen är låg. Idag finns förkvalificerad volym på FCR-D ned och just nedreglering passar solkraft bättre då det är lättare att spilla sol för att leverera produkten än att producera mer sol för att delta på uppreglning. Solkraft är likt vätgasteknologier ansluten till elnätet via kraftelektronik vilket gör att det rent tekniskt till stor del är kraftelektronikens reglerförmåga som sätter gränser för vilka produkter som kan levereras.

Vindkraften har på senare tid börjat leverera stödtjänster främst nedregleringsprodukterna FCR-D ned och aFRR ned. Vindkraftens tekniska egenskaper likt solkraft gör den speciellt lämpad för att leverera nedreglering eftersom det är lättare att spilla vind för nedreglering än att lämna utrymme för möjlighet till mer produktion för uppreglning. Även vindkraft är ansluten via kraftelektronik.

7 Slutsats och diskussion

Elproduktionen behöver momentant anpassas till rådande efterfrågan på el, och obalanser mellan tillförsel och efterfrågan kan påverka systemets frekvensnivå. Elektrolysörer och vätgasbaserad elproduktion skulle kunna vara viktiga resurser för att balansera efterfrågan och tillförsel via Svenska kraftnäts marknader för stödtjänster. Rent tekniskt har elektrolysörer goda förutsättningar för att bidra till kortsiktig balansering, men deras faktiska bidrag beror på deras konkurrenskraft gentemot andra kraftslag som deltar på marknaderna. Andra teknologier som framöver förväntas ta marknadsandelar på frekvensmarknaderna är energilager,

flexibel förbrukning och vindkraft och det är mot dessa teknologier samt de som redan deltar som vätgasteknologier kommer att behöva konkurrera.

Av de olika elektrolysörteknikerna som finns tillgängliga eller är under utveckling erbjuder PEM-tekniken den största möjligheten för kortsiktig balansering av elsystemet, medan alkaliska och SOEC-tekniker skulle kunna nyttjas om de kombineras med teknologi som kan ta hand om snabb upprampning och variationer i reglerbehov. Vätgasdrivna gasturbiner och bränsleceller kan också utifrån sin tekniska förmåga bidra till kortsiktig balansering av elsystemet. Noterbart är även att eftersom vätgasdrivna gasturbiner är i ett tidigt utvecklingsstadium finns potential för förbättringar av driften som skulle kunna möjliggöra större utrymme för reglering och därmed möjlighet att delta på fler stödtjänstemarknader jämfört med dagens fossildrivna gasturbiner som endast deltar i mFRR och störningsreserven.

Referenslista

- BP. (2022). *Press release - BP Welcomes Federal Funding for Green Hydrogen Hub at Kwinana, Western Australia*. Hämtat från https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/en_au/australia/home/media/media-releases/bp-welcomes-federal-funding-for-green-hydrogen-hub-at-Kwinana-Western-Australia.pdf
- Energiforsk. (2021). *Sektorkoppling för ett mer effektivt energisystem*. Energiforsk. Hämtat från <https://energiforsk.se/media/29722/sektorkoppling-for-ett-mer-effektivt-energisystem-energiforskrapport-2021-764.pdf>
- IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Hämtat från https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf?rev=4ce868aa69b54674a789f990e85a3f00
- RISE. (2021). *Studie över elektrolys-teknologier idag och i framtiden*. RISE. Hämtat från https://www.ri.se/sites/default/files/2022-05/HyCoGen%20Studie%20%C3%B6ver%20elektrolys-teknologier%20idag%20och%20i%20framtiden_0.pdf

VÄTGAS FÖR ETT BALANSERAT ELSYSTEM – ANALYS AV STÖDTJÄNSTMARKNADER

I den här rapporten analyseras vätgasens roll för den mycket kortsiktiga balanseringen som sker på de specifika marknaderna för stödtjänster. De viktigaste resultaten i rapporten är att ur ett tekniskt perspektiv har både elektrolysörer och vätgasdrivna gasturbin och bränsleceller goda förutsättningar för att bidra till kortsiktig balansering, men deras faktiska bidrag beror på deras konkurrenskraft gentemot andra kraftslag som deltar på marknaderna. Andra teknologier som framöver förväntas ta marknadsandelar på frekvensmarknaderna är energilager, flexibel förbrukning och vindkraft och det är mot dessa teknologier samt de som redan deltar som vätgasteknologier kommer att behöva konkurrera.

Av de olika elektrolysersteknikerna som finns tillgängliga eller är under utveckling erbjuder PEM-tekniken den största möjligheten för kortsiktig balansering av elsystemet, medan alkaliska och SOEC-tekniker skulle kunna nyttjas om de kombineras med teknologi som kan ta hand om snabb upprampning och variationer i reglerbehov. Gällande vätgasdrivna gasturbiner och bränsleceller så har båda teknikerna i nuläget höga investerings- och driftskostnader, låg verkningsgrad jämfört med andra alternativ, såsom batterier, flexibel förbrukning och vattenkraft. Slutsats är att vätgasbaserad kraftproduktion sannolikt inte kommer att vara ett konkurrenskraftigt alternativ för kortsiktig balansering på stödtjänstmarknaderna på kort sikt, på längre sikt dock om det sker betydande förbättringar i investeringskostnaden och för gasturbiner även förbättrade köregenskaper kan de möjligen vara med och konkurrera på stödtjänstmarknaderna.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.