LÖSNINGAR FÖR ÖKAD FLEXIBILITET I ELSYSTEMET – MÖJLIGHETER OCH UTMANINGAR

En rapport till Svenskt Näringsliv
2020

PROJ NO: 15005678

SWECO

Copyright © 2020 Sweco Energy AB

All rights reserved

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior written permission of Sweco Energy AB.

Disclaimer

While Sweco Energy AB (”Sweco”) considers that the information and opinions given in this work are sound, all parties must rely upon their own skill and judgement when making use of it. Sweco does not make any representation or warranty, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of the information contained in this report and assumes no responsibility for the accuracy or completeness of such information. Sweco will not assume any liability to anyone for any loss or damage arising out of the provision of this report.

Rapportnamn	Lösningar för ökad flexibilitet i elsystemet
Datum för färdigställande	2020
Versionsspårning	Slutversion
Projektledare	Erica Edfeldt
Författare	Linda Dyab, Linda Schumacher, Erica Edfeldt, Johan Bruce
Kvalitetsgranskare	Erica Edfeldt

SAMMANFATTNING

Flexibilitetsbehovet ökar i det svenska elsystemet, och huvudsakligen kommer behovet från variationerna i efterfrågan samt från ökad variabel elproduktion av sol- och vindkraft. Dessutom har ett ökat elbehov, framförallt i storstäderna, lett till utmaningar för både stamnät och underliggande nät då utbyggnaden av elnätet inte har hunnit med i den snabba tillväxttakten vilket har resulterat i lokala kapacitetsproblem i vissa regioner.

Flexibilitet är ett allmänt och inte entydigt samlingsbegrepp som innefattar flertalet situationer, behov och åtgärder för att kunna reglera elsystemet och möta efterfrågan varje timme på året. Flexibiliteten kan finnas i olika former, variera från en tidpunkt till en annan samt variera beroende på hur den geografiska systemgränsen dras. Sweco har valt att dela in de olika formerna av flexibilitet i flexibel produktion, flexibel användning och energilager.

Studien innefattar följande flexibilitetsresurser:

Flexibel produktion	Efterfrågeflexibilitet	Energilager
• Kraftvärme • Effekthöjning i vattenkraft • Gasturbiner • Flexibel kärnkraft	• Efterfrågeflexibilitet hos hushåll • Efterfrågeflexibilitet hos industrin • Smart laddning	• Batterier • Power-to-gas (vätgaslager) • Pumpkraft • Vehicle-to-grid

Figur A: Flexibilitetsresurser som omfattas i studien

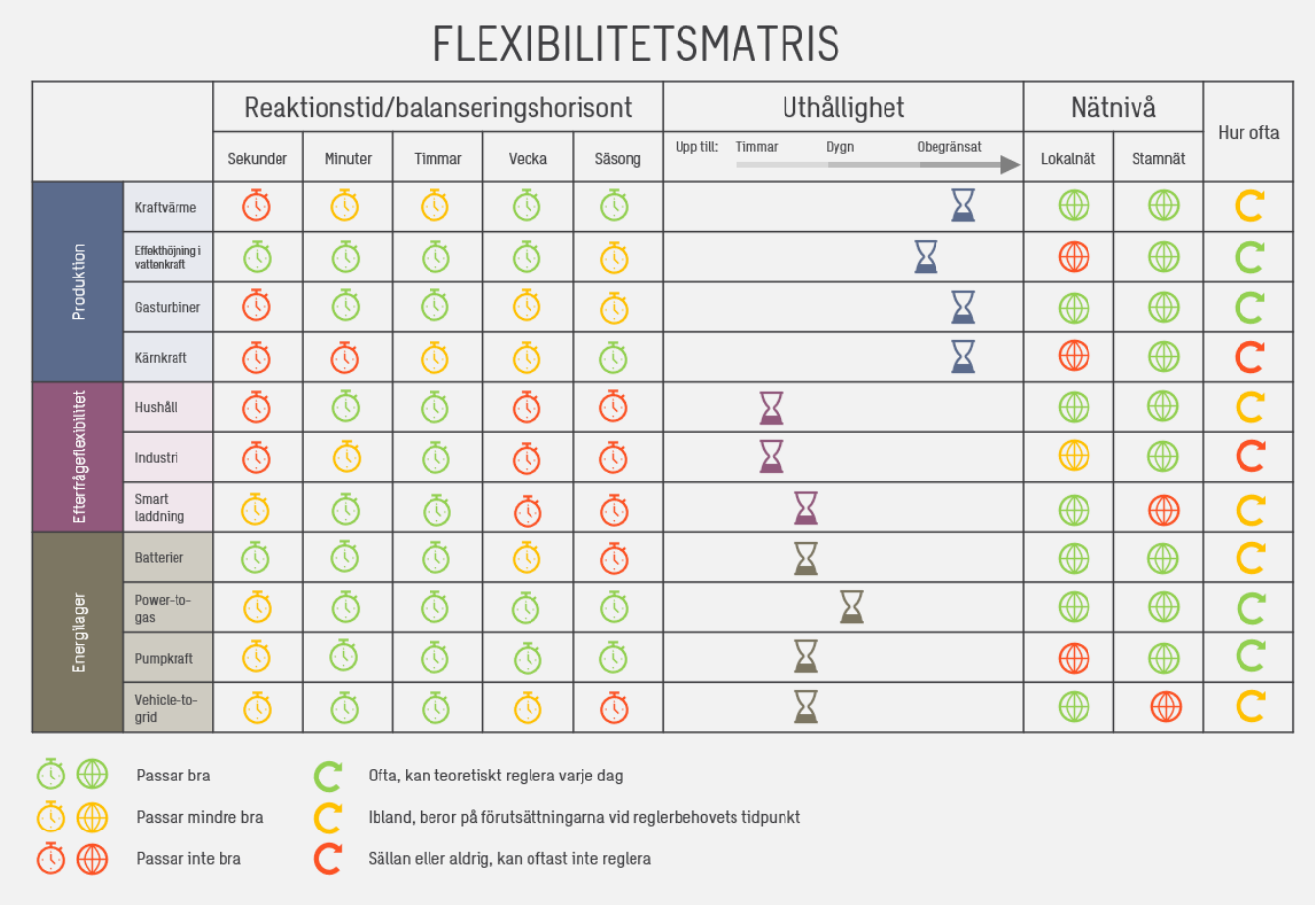
Flexibiliteten presenteras genom ett antal definierade parametrar som består av reaktionstid/balanseringshorisont, uthållighet, nätnivå, hur ofta resursen kan ge upprepade svar samt en ansats till kvantifiering av maximal potential uttryckt i MW i den mån det är relevant och finns information.

Resultatet visar att samtliga analyserade *produktionsresurser* har goda egenskaper i form av uthållighet, och kan drivas större delen av året. Dock har vissa av dem idag dålig lönsamhet.

Efterfrågeflexibilitet kan vara kostnadseffektivt då det kan handla om att periodvis flytta förbrukning i tid. Det finns dock begränsningar i tillgänglighet (inte alltid möjligt att öka/minska effektuttag) och i uthållighet, då en neddragning eller lastflyttning ofta endast är tillgänglig ett par timmar.

Energilagerteknologierna är uthålliga i timmar upp till dygn med en generellt sett snabb responstid. Dock är energilager idag relativt dyra, även om kostnaden har minskat gradvis.

Produktionsresurser och vissa typer av energilager (såsom exempelvis vattenkraft) kan i generella drag beskrivas som lämpliga för säsongsbalansering, medan efterfrågeflexibilitet fungerar på en dygnsskala. Teknologierna är kompletterande av varandra och deras potential går att utnyttja vid olika tidstillfällen och i olika tidsramar beroende på den enskilda flexibilitetsresursens förutsättningar vid flexibilitetsbehovet.



Figur B: Resultatmatris

Sammanfattningsvis kan sägas att det finns många olika sorters flexibilitet och att de tillsammans har betydande potential. Dock finns det utmaningar som bristande struktur, kunskap och inte minst incitament för att flexibilitetspotentialen ska kunna realiseras fullt ut.

Förkortningar och begreppsbeskrivningar

Black-start	Återställandet av elförsörjning efter ett elavbrott utan att förlita sig på stamnätet för återhämtning av en total eller delvis nedstängning
Effektreserv	Reservkraft som SvK upphandlar vid kalla vinterdagar med höga förbrukningstoppar genom att antingen låta aktörer på elmarknaden ställa produktionskapacitet till förfogande eller genom att minska elförbrukningen. I den upphandlade effektreserven för vintern 2019-2020 finns totalt 752 MW varav 562 MW står för elproduktion (Karlshamnsverket) och 190 MW för reduktion av elförbrukning (av flera aktörer inom skogsindustrin)
Ei	Energimarknadsinspektionen
Elintensiv industri	Verksamhet som bedrivs och under de senaste tre åren har bedrivits industriell tillverkning i en process i vilken det använts i genomsnitt minst 190 megawattimmar el för varje miljon kronor av förädlingsvärdet av den elintensiva industrins produktion, eller för vilken avdrag eller återbetalning får göras för skatt på elektrisk kraft enligt 11 kap 9 § 2, 3 eller 5 lagen (1994:1776) om skatt på energi (LSE).
Energitäthet	Mängd energi (Wh) som finns lagrad per volym- eller massenhet i ett system
Frekvens	Antalet repeterade händelser inom ett tidsintervall. I elnätet ska den elektriska frekvensen hållas till 50 Hz
Installerad effekt	Ett kraftverks installerade effekt innebär den maximala kraften den kan generera i termer av watt (W)
Intradag-handel	Kontinuerlig fysisk handel från Elspots stängning till en timme före driftstimmen
Laddningscykel	Cykeln som inkluderar urladdning och laddning för batterier
LBG	Liquified Bio Gas (flytande biogas)
LNG	Liquified Natural Gas (flytande naturgas)
mFRR	Manuell frekvensreserv för att stabilisera frekvensen i elsystemet
Responstid	Hur snabbt en resurs reagerar på en signal för reglering

Urladdningsdjup	Refererar till hur mycket energi som omsätts in och ut från ett batteri i en given laddningscykel, uttryckt i % av den totala effekten av batteriet
Verkningsgrad	Betecknar förhållandet mellan nyttiggjord och tillförd energi i ett system (ett kraftverk till exempel)
Spotmarknad	Marknadsplats för handel med el per timme för leverans nästa dygn
Störningsreserv	En effektreserv som SvK ansvarar över och som på högst 15 min ska sättas in vid oväntat bortfall av elproduktion. Består idag av ett antal gasturbiner
SvK	Svenska Kraftnät

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING

FÖRKORTNINGAR OCH BEGREPPSBESKRIVNINGAR

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING OCH BAKGRUND 1

1.1 Bakgrund 1

1.2 Avgränsningar 1

1.3 Behovet av flexibilitet 2

1.4 Definition och kategorisering av flexibilitet 3

1.5 Frågeställningar 3

2 OLIKA TYPER AV FLEXIBILITET 4

2.1 Flexibel produktion 5
2.1.1 Kraftvärme 5
2.1.2 Effekthöjning i vattenkraft 7
2.1.3 Gasturbiner 9
2.1.4 Flexibel kärnkraft 11
2.1.5 Sammanfattning av flexibel produktion 12

2.2 Flexibel användning 14
2.2.1 Efterfrågeflexibilitet hos hushåll (uppvärmning) 15
2.2.2 Efterfrågeflexibilitet hos industrin 17
2.2.3 Smart laddning av elfordon 20
2.2.4 Sammanfattning av flexibel användning 21

2.3 Energilager 23
2.3.1 Batterier 23
2.3.2 Power-to-gas (vätgaslager) 24
2.3.3 Pumpkraft 26
2.3.4 Vehicle-to-grid 28
2.3.5 Övriga energilagringsteknologier 29
2.3.6 Sammanfattning av energilager 29

3 SLUTSATSER 31

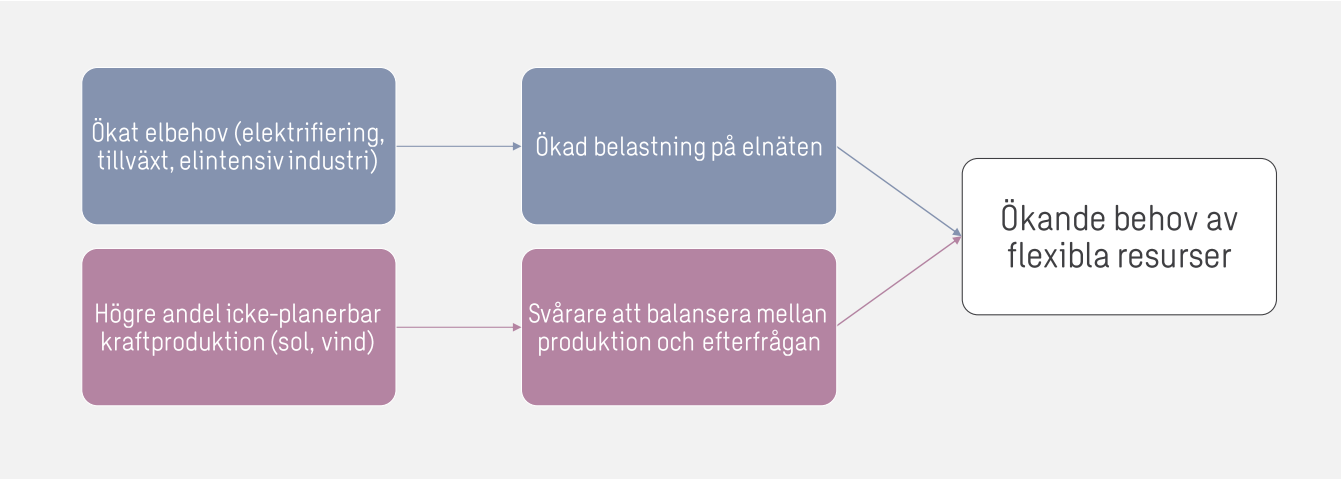
1 Inledning och bakgrund

1.1 Bakgrund

Drivkrafterna för ett ökat flexibilitetsbehov kommer från olika håll. Huvudsakligen kommer behovet av ökad flexibilitet från variationerna i efterfrågan samt från ökad variabel elproduktion av sol- och vindkraft. Efterfrågan har ett typiskt förutsägbart mönster på dygn, vecka och säsong. Solkraft är också förutsägbar med tydliga dygns- och säsongsmönster (som inte sammanfaller med ett typiskt efterfrågemönster). Vindkraft är mindre förutsägbar under korta tidsperioder men har ett visst säsongsmönster. Exempelvis brukar vindförhållanden i regel vara under ett antal dagar. En högre andel väderberoende icke-planerbar kraftproduktion bidrar till ett kraftsystem med fler ansträngda situationer där balanseringen mellan produktion och efterfrågan blir mer utmanande.

Dessutom har ett ökat elbehov, framförallt i storstäderna, lett till utmaningar för både stamnät och underliggande nät då utbyggnaden av elnätet inte har hunnit med i den snabba tillväxttakten vilket har resulterat i lokala kapacitetsproblem i vissa regioner.

Givet de här nya utmaningarna som elmarknaden står inför, se Figur 1, blir det mer angeläget att ta tillvara på de olika flexibilitetsresurser i elsystemet, det vill säga flexibel produktion, efterfrågan och lagring. I framtida scenarion talar man dessutom även om ökad överföringskapacitet i Europa, med utbyggda transmissionsledningar. En starkare koppling mot omkringliggande marknader väntas även det leda till ett ökat flexibilitetsbehov i Norden, eftersom många andra länder i Europa har en begränsad flexibel produktion på grund av variabel produktion och kondenskraft. Dessutom är det flera länder som redan idag nyttjar den nordiska vattenkraftens flexibilitet och de ser framför sig att de även i framtiden kommer att kunna använda nordisk vattenkraft som ”Europas gröna batteri”.



Figur 1: Två huvudanledningar till varför det finns ett ökat behov av flexibilitet i det svenska elnätet

1.2 Avgränsningar

Denna studie kvantifierar i den mån det är möjligt behov eller potential för flexibilitet i Sverige. Detta är en förenkling då elsystemet är starkt sammankopplat med övriga Norden, Baltikum och kontinentala Europa. Denna koppling kommer att bli starkare över tid då nya förbindelser tillkommer. En starkare koppling till omvärlden innebär att flexibilitetsbehovet i viss utsträckning kan importeras från andra länder, men det betyder också att de svenska resurserna kan användas för att möta ett flexibilitetsbehov i andra länder.

Bedömningarna i denna rapport kommer från ett stort antal källor och ska ses som en syntes av kunskapsläget idag. Det betyder att metodologin som använts för att uppskatta behov eller potential inte alltid är helt konsekvent och de kvantifieringar som anges i denna rapport är till för att ge en storleksordning snarare än en absolut sanning.

Samtliga flexibilitetsresurser är bedömda utifrån deras nuvarande teknikläge, utan hänsyn till huruvida de används för flexibilitet i stor skala idag eller inte. Flexibilitetsresurser som redan används idag inkluderar effektreserven, vattenkraft och gasturbiner, och till viss del efterfrågeflexibilitet och smart laddning av elfordon.

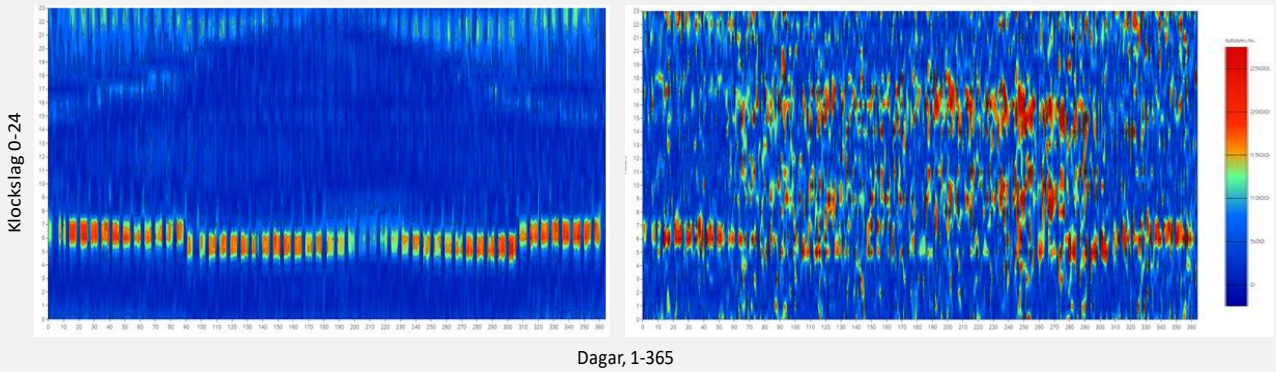
1.3 Behovet av flexibilitet

Begreppet flexibilitet handlar inte bara om kraftbalansen utan också om att klara belastningen på elnäten. Det går heller inte att på ett entydigt sätt ange hur mycket flexibilitet som finns idag och i vilken mån den räcker till för att hantera ett framtida behov. I en studie åt Forum för smarta elnät tog NEPP fram en rapport[1] om behovet av flexibilitet i framtiden. I denna konstateras att behovet av balansering på tim- och veckonivå kommer att fördubblas till 2040 i ett scenario där kärnkraften ersätts med vind- och solkraft. På timnivå ökar behovet från 2500 MW/h till 4400 MW/h till exempel. Vidare tillkommer ett behov av topplast på cirka 7 000 MW samt att överskottselen kommer uppgå till 3 TWh per år. För att ta hand om denna produktion krävs flexibel användning, energilager och ett förstärkt stamnät, se Figur 2.

		Balansreglering timme	Balansreglering vecka	Överskott	Topplast 1h	Topplast dygn
Storleksordning	2018	2 500 MW/h	7 500 MW/v	0 TWh	- 850 MW	+1 650 MW
	ca 2025	2 700 MW/h	9 100 MW/v	0 TWh	- 3 000 MW	- 500 MW
	ca 2035	3 600 MW/h	12 100 MW/v	1 TWh	- 5 000 MW	- 2500 MW
	2040	4 400 MW/h	14 200 MW/v	3 TWh	- 8 000 MW	- 5500 MW

Figur 2: Behovet av flexibilitet i olika tidshorisonter[2]

I rapporten konstateras det också att utöver att behovet av balansering kommer att öka kommer behovet av balansering att ske oftare och mer oförutsägbart, vilket illusteraras i Figur 3. Den vänstra figuren visar variationerna 2015, och den högra figuren visar variationerna 2040. Skalan längst ut till höger går från 0 (blå färg) till 2 500 (röd färg) MWh/h och markerar förändringen i nettolast från en timme till en annan. I den högra figuren för år 2040 kan det observeras att den röda färgen uppträder mer, och mer inkonsekvent jämfört med den vänstra figuren för år 2015, vilket innebär större variationer i nettolast över året.



Figur 3: Förändringar i nettolast från en timme till en annan. På y-axeln visas tid på dygnet från 0-24h. På x-axeln visas dagar på året från 1-365 dagar, dvs. från 1 januari till 31 december[3]

[1] NEPP: *Flexibilitet i en ny tid*, 2018
[2] Ibid
[3] Ibid

1.4 Definition och kategorisering av flexibilitet

Flexibilitet kan delas upp i flera dimensioner. Reaktionstid och balanseringshorisont talar om hur snabbt och i vilken tidshorisont som den flexibla resursen kan användas. Reaktionstiden kan handla om millisekunder upp till timmar eller dygn, och balanseringshorisonten kan vara från sekunder, minuter, timmar, en vecka och upp till säsonger. Med uthållighet menas hur länge en resurs kan användas. Vissa teknologier har en begränsning och andra inte, till exempel kan ett batteri vanligtvis generera el i upp till några timmar och behöver sedan laddas. En gasturbin kan däremot teoretiskt drivas på obestämd tid, förutsatt att den förses med bränsle.

Ytterligare en dimension som beaktas är inom vilket geografiskt område resursen kan tillföra nytta, här genom att redovisa om den kan anslutas till lokalnätet och/eller stamnätet.

Vidare avses att redovisa förmåga till upprepade svar inom en viss tidsperiod för respektive resurs, vars syftet är att ge en fingervisning på *hur ofta* en flexibilitetsresurs har möjlighet att bidra med flexibilitet. Till exempel kan det handla om flera gånger per dag (vattenkraft) eller endast begränsat antal gånger under en viss årstid (kärnkraft på sommaren).

Ytterligare en dimension som beaktats är den maximala potentialen av flexibilitet i termer av effekt [MW], **i den mån information finns tillgänglig**. Med maximal potential menas vilken maximal effekt en flexibilitetresurs har möjlighet att *ytterligare* bidra med, genom exempelvis utbyggnad (vattenkraft/kraftvärme till exempel) eller applicering (efterfrågeflexibilitet hos hushåll till exempel), utöver dagens utgångspunkt.

I Figur 4 redovisas rubrikerna för respektive kategori i vilka flexibilitetsresurserna studeras.

Reaktionstid/balanseringshorisont					Uthållighet	Nätnivå		Hur ofta
Sekunder	Minuter	Timmar	Vecka	Säsong	Upp till: Timmar → Dygn → Obegränsat	Lokalnät	Stamnät	

Figur 4: Olika flexibilitetsdimensioner

1.5 Frågeställningar

Mer specifikt gör den här rapporten en ansats att besvara följande frågor:

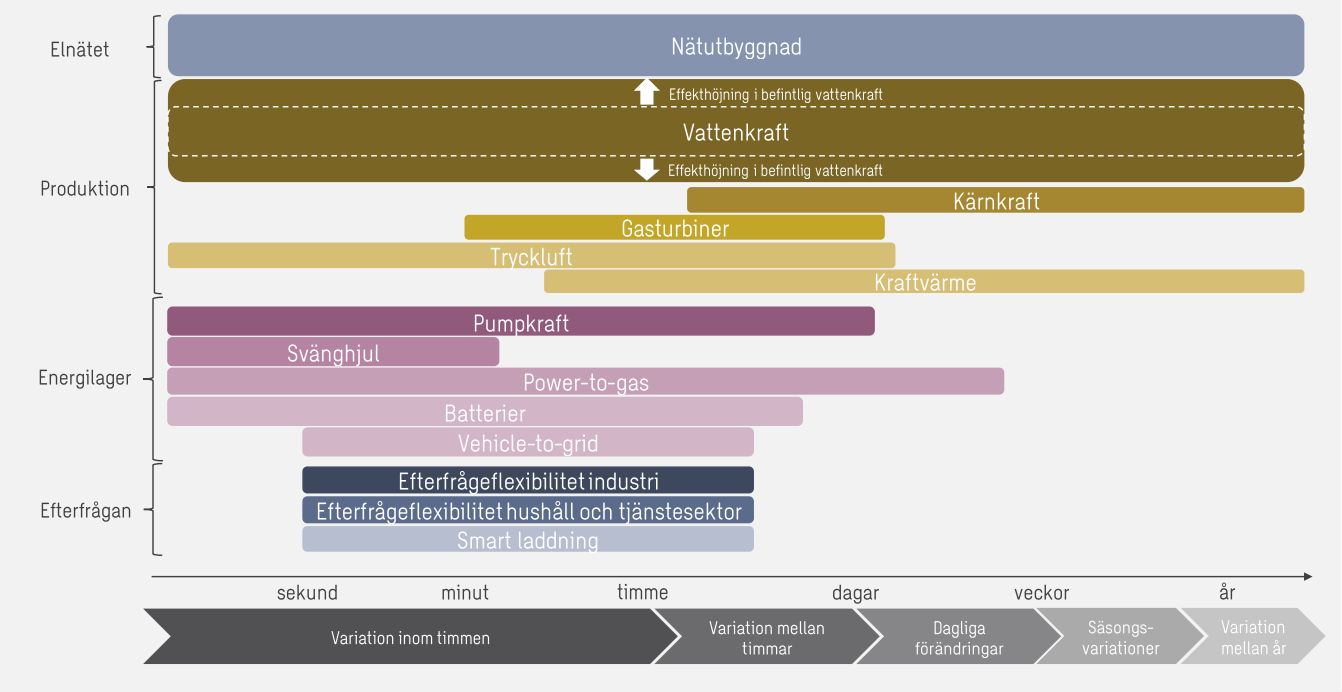
- Vilka olika lösningar finns för ökad flexibilitet i elsystemet på kort och lång sikt?
- Vilken problematik i elsystemet kan de olika lösningarna bidra till att lösa/hantera? (T.ex. lokal kapacitetsbrist, effektbrist på nationell nivå etc.)
- Vilka hinder/utmaningar finns för dessa lösningar?
- Vilka ekonomiska förutsättningar har dessa lösningar?
- Hur stor bedöms den realiserbara potentialen [MW] för dessa lösningar vara?

2 Olika typer av flexibilitet

Flexibilitet är ett allmänt och inte entydigt samlingsbegrepp som innefattar flertalet situationer, behov och åtgärder för att kunna reglera elsystemet och möta efterfrågan varje timme på året. Flexibiliteten kan finnas i olika former, variera från en tidpunkt till en annan samt variera beroende på hur den geografiska systemgränsen dras[4]. En förutsättning för att det alltid ska vara balans mellan tillgång och efterfrågan på el är att det finns tillräckligt med utrymme och kapacitet i elnätet för att kunna leverera elen till slutkund. Den snabba tillväxttakten i storstadsregioner innebär att det ställs högre krav på kortare ledtider för nya anslutningar än tidigare och är en utmaning för lokalnäten idag. Ny elintensiv industri, elektrifiering av transportsektorn och större elproduktion från sol- och vindenergi medför även utmaningar för såväl stamnätet som underliggande nät.

Med bakgrund av de här förutsättningarna uppnås ett flexibelt elsystem mest troligtvis genom en samverkan av flera flexibilitetsteknologier och strategier. Den här rapporten gör en ansats att beskriva de vanligaste teknologierna och lösningarna indelade i olika kategorier bestående av flexibel produktion, flexibel last (efterfrågeflexibilitet) och energilager. Vissa teknologier ligger i gränsdragningen mellan kategorierna. Ett exempel är vattenpumpkraft som är en elproduktionsenhet men även utgörs av vattensamling som kan betraktas som energilager.

Utbyggnad av elnät är en viktig åtgärd som främst möjliggör ett mer flexibelt elsystem, varför den inte kommer behandlas som en egen enhet i den här studien. Se Figur 5 för illustrering.



Figur 5: Lösningar, uppdelade i produktion, energilager och efterfrågan, för ökad flexibilitet i elsystemet

En alternativ lösning till att klara el- och effektfrågan är att vid underskott importera från grannländerna. Dock finns problematiken att det inte alltid säkert finns tillgänglig el att tillgå hos grannländerna.

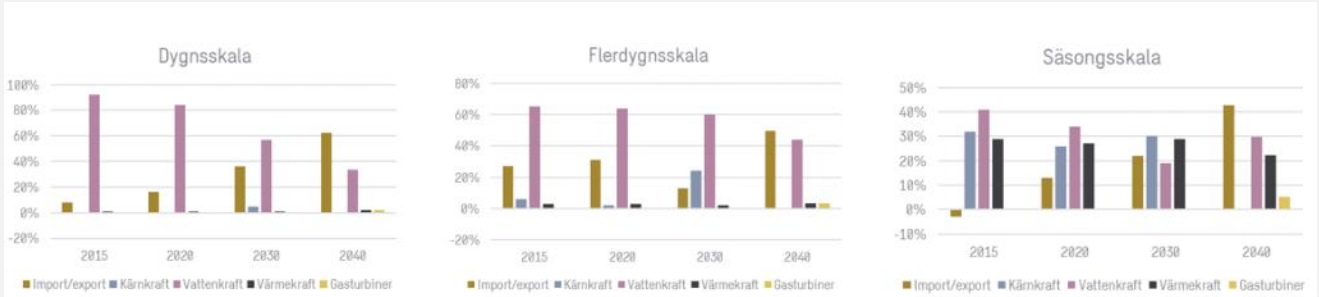
[4] NEPP: *Flexibilitet i en ny tid*, 2018

2.1 Flexibel produktion

I detta delkapitel beskrivs flexibel produktion i form av kraftvärme, effekthöjning i vattenkraft, kärnkraft och gasturbiner. I dagsläget används vattenkraft som flexibilitetsresurs för balansering i alla tidshorisonter i kraftsystemet. Den är anpassad till att kunna hantera dygnsvariationer i efterfrågan, som i framtiden även kan komma att innefatta vindkraftens typiska flerdygnsvariationer[5]. I den här delen av rapporten fokuseras det främst på effekthöjning av vattenkraften, det vill säga vilken tillkommande flexibilitet som vattenkraften har potential att bidra med. Gasturbiner används främst för spetsförsörjning och som reserver i dagsläget. Flexibel kraftvärme och flexibel kärnkraft har potential att bidra med flexibilitet genom att öka eller minska sin elproduktion. Ytterligare teknologier som i teorin kan bidra med flexibilitet är vind- och solenergi, genom att användas till att pumpa upp vatten i pumpverk eller till att producera vätgas. De kommer inte behandlas separat här eftersom de snarare möjliggör flexibilitet än att vara en flexibel resurs i sig.

I en studie[6] utförd av Sweco visas hur de olika teknologierna samt import och export av el har bidragit, och väntas bidra, till reglerarbetet i olika tidshorisonter fram till 2040. Vattenkraftens procentuella dominans i reglerarbetet väntas minska på dygnsskalan genom att import och export får stå för en större del av det ökade reglerbehovet (vattenkraftens absoluta reglerbidrag väntas troligtvis inte minska). Ökade utlandsförbindelser och kontinentens reglerbehov snarare än endast Sveriges väntas också vara bidragande orsaker.

I en flerdygnsskala uppvisas ett liknande mönster med det undantag att kärnkraft år 2030 väntas bidra med mer reglering. Det är osäkert om kärnkraften kommer fungera på det här sättet, det är resultat från Swecos elmarknadsmodell Apollo som reglerar ned kärnkraften vid mycket låga priser. Behovet av nedregleringen finns oavsett. I en säsongsskala kommer import och export att öka, samtidigt som vattenkraftens procentuella bidrag på grund av det minskar. 2040 ökas vattenkraftens bidrag igen när kärnkraften avvecklats. Se Figur 6.



Figur 6. Olika resursers bidrag till reglerarbetet i dygnskala, flerdygnsskala och säsongsskala fram till år 2040

2.1.1 Kraftvärme

Kraftvärmeverk genererar el och värme till elsystemet respektive fjärrvärmesystemet och är på så vis högeffektiva. Cirka 40 % av all värme i de svenska fjärrvärmenäten produceras idag i kraftvärmeverk, resten kommer från värmeverk, industriell restvärme och värmepumpar[7]. Kraftvärmeverk finns nära förbrukaren och bidrar med lokal elproduktion som har möjlighet att underlätta kapacitetsbrist i lokalnäten. Kraftvärmen har ingen begränsning i uthållighet och kan reglera med inom timmars marginal beroende på förutsättningarna samt drivas största delen av året. Den bidrar idag med

[5] Sweco: *Potential för efterfrågeflexibilitet - en rapport till Skellefteå Kraft*, 2019
[6] NEPP: *Flexibilitet – i en ny tid*, 2018
[7] Sweco: *100 % förnybart med fjärrvärme och kraftvärme*, 2019

säsongsbalansering då den producerar mer på vintern när det är kallt och efterfrågan är stor, och mindre på sommaren när det är varmt och efterfrågan är lägre.

Typ av flexibilitet kraftvärmen kan bidra med

Kraftvärmeverk kan bidra med flexibilitet genom att antingen öka eller minska sin elproduktion. Vidare kan kraftvärmeverk även avlasta elsystemet i de fall då fjärrvärme används istället för elbaserad uppvärmning (exempelvis direktel, elpanna eller värmepump). Denna effekt kan dock även fås genom att uppvärmning sker genom andra metoder, som till exempel pelletseldning.[8]

Det finns flera tekniskt möjliga alternativ för att bygga om och modifiera kraftvärmeverk för att uppnå ökad elproduktion. Nedan beskrivs fyra exempel:

- **Kondenssvans**. En kondenssvans innebär att det installeras en extra turbin intill den ordinarie mottryckturbinen. Vid hög elefterfrågan kan ångan helt eller delvis ledas genom den extra turbinen för att producera elkondenskraft, istället för att kondenseras i en fjärrvärmekondensator för fjärrvärmeproduktion. Genom en ventil kan ångan styras och köras via kondenssvansen vid högre elbehov alternativt ledas via den ”ordinarie” vägen och producera både el och värme.
- **Förbränning av torkat bränsle**. Att förbränna torrare bränslen i ångpannan i ett kraftvärmeverk medför högre förbränningstemperatur och mindre rökgasflöde. Det beror på att mindre energi krävs för att förånga vattnet i ett torkat bränsle, ånga som hade gått ut med rökgasflödet och varit ”förlorad” såvida inte en rökkondensor finns installerad. Således höjs förbränningstemperaturen i ångpannan vilket innebär högre effektivitet för pannan, som driver på ångturbinen ytterligare och resulterar i högre elproduktion. Värmen som produceras i kraftvärmeverket kan således skickas ut i fjärrvärmesystemet om efterfrågan finns, alternativt användas för att torka bränsle genom bäddtorksteknik.
- **Säsongsvärmelager**. I anslutning till ett kraftvärmeverk kan det byggas värmelager bestående av till exempel ackumulatortankar, groplager eller bergsrum. När det råder hög elefterfrågan och låg värmefterfrågan kan ett lager med hetvatten upprättas som sparas för högre värmeefterfrågan. Det här är ett sätt att frikoppla elproduktion och värmeproduktion, och att använda kraftvärmeverkets fulla potential vid hög efterfrågan på el.
- **Energikombinatsystem**. Ett kraftvärmeverk kan byggas om till att producera el, värme samt bränslen. Bränslena kan utgöras av pellets och/eller metan som framställs via torkning och förgasning. Intäkter kan genereras av längre drifttid, ökad elproduktion samt försäljning av bränslena.[9,10]

I en studie utförd av Värmeforsk[11] visades att svenska kraftvärmeverk har möjlighet att bidra med primär frekvensreglering (FCR-N) på ett konkurrenskraftigt och lönsamt sätt. Kraftvärmeanläggningarna visades vara uthålliga ett antal minuter men hade svårare till längre eller flera upprepade svar.

Potential på kort och lång sikt

I en rapport[12] från Energimyndigheten undersöktes tre möjliga sätt för ökad elproduktion: fjärrvärmeunderlaget bibehålls eller ökas vilket möjliggör ytterligare elproduktion inom kraftvärme, värmeverk ersätts med kraftvärmeverk eller att befintliga kraftvärmeanläggningar ersätts med nya anläggningar med högre elutbyte och drifttidsförlängning. Bedömning gjordes att den totala elproduktionen från kraftvärmen kan uppgå till 35 TWh per år, jämfört med dagens 15 TWh per år. Effektökningen uppskattades dock inte i denna studie.

---

[8] Sweco: *100 % förnybart med fjärrvärme och kraftvärme*, 2019
[9] Regeringskansliet: *Fjärrvärme och kraftvärme i framtiden*, 2005
[10] L. Jönsson, A. Parrow: *Lönsamhetsanalys av tekniker för utökad elproduktion i kraftvärme*, 2012
[11] Värmeforsk: *Undersökning av möjligheter för svenska kraftvärmeverk att leverera primär frekvensreglering, FCR-N*, 2014
[12] Energimyndigheten: *100 procent förnybar el, delrapport 2, ER 2019:6,* 2019

Utmaningar

Utmaningar kopplade till att modifiera kraftvärmeverken med syfte att producera mer el är att värmen måste få avsättning, antingen till fjärrvärme eller industriella processer. Ökat utnyttjande av restenergier står även delvis i konflikt med ökad kraftvärme, även om de även kan komplettera varandra. Det är möjligt att endast producera el i anläggningarna och spilla bort värmen till luft, vattendrag eller hav alternativt lagra i ackumulatortankar eller andra lagringsalternativ. Det här skulle dock vara på bekostnad av bränslets resurseffektivitet och ha högre kostnader.[13]

Vid konvertering av elbaserad uppvärmning till fjärrvärmebaserad uppvärmning finns en begränsning i potentialen kopplad till fjärrvärmesystemets lokalisering. Fjärrvärmesystemet är inte utbyggt i glest bebyggda områden varför exempelvis småhus som ligger långt utanför stadskärnor vanligtvis inte är ekonomiskt lämpliga att ansluta till fjärrvärme.[14]

Ekonomiska förutsättningar

Befintliga kraftvärmeverk kan redan idag producera mer el än vad de gör men de ekonomiska förutsättningarna saknas.[15] Eftersom kraftvärmeverk både bidrar med el och värme måste produktionen i en viss mån vara samordnad mellan de olika systemen. Ett kraftvärmeverk med kondenssvans kan producera mer el än ett kraftvärmeverk utan kondenssvans. Vid elunderskott är det troligt att det även råder värmeunderskott. Det här innebär att i timmar då det skulle vara relevant att producera extra el, exempelvis genom att använda kondenssvansven, innebär den extra elproduktionen att man i så fall skulle få ut mindre värme. Om ångan leds genom kondenssvansen produceras el på bekostnad av värmeproduktion. Det kan innebära att den uteblivna värmeproduktionen måste ersättas med annan spetsvärmeproduktion som i regel är baserad på olja eller annat dyrt bränsle. Som nämnt innan kan mer el fås ut om bränslet är torrare. Att torka bränslet är dock dyrare.[16]

Vid situationer då det råder ett överskott på el kan kraftvärmeverk minska sin elproduktion för att exempelvis ge mer plats för intermittent kraft. Kraftvärmeverk, som drivs på biobränsle eller avfall, kan i dessa fall finna ekonomiska incitament att fortsätta drivas. Kraftvärmeverk som drivs på biobränslen får elcertifikat vid elförsäljningen (under anläggningens första år), och kraftvärmeverk som förbränner avfall får betalt för att ta emot avfallet. I praktiken kan det innebära det att kraftvärmeproducenterna måste ersättas för att avstå att producera el.[17]

Historiskt har elpriset varit relativt lågt och det inte varit lönsamt att öka värmeunderlaget för att kunna generera mer el. Om elpriserna blir tillräckligt höga kan det vara lönsamt att låta kraftvärmeverken köras och kyla bort värmen.

Vidare innebär regeringens beslut om reducerade nedsättningar på energi- och koldioxidskatt för värmeproduktion i fossilt drivna kraftvärmeverk ökade kostnader. Konsekvenserna kan vara att kraftvärmeverken väljer att stänga tidigare än planerat, vilket kan leda till ökad problematik kopplad till lokal effektbrist och kapacitetsbrist.

2.1.2 Effekthöjning i vattenkraft

Vattenkraften har en central roll i det svenska elsystemet idag och bidrar med såväl en betydande andel av elproduktionen som med flexibilitet och reglering. Mellan 40 och 50 % av den svenska elförsörjningen kommer från vattenkraft under ett normalår. Vattenkraftens förmåga att kunna reglera elsystemet i en bred tidshorisont mellan sekunder upp till säsongsvariation gör den lämplig ihop med intermittenta kraftslag, där vattenkraftens roll blir allt mer viktig i takt med att vindkraften och solenergin byggs ut.[18]

---

[13] Energimyndigheten: *100 procent förnybar el, delrapport 2, ER 2019:6*, 2019
[14] Sweco: *100 % förnybart med fjärrvärme och kraftvärme,* 2019
[15] Ibid
[16] NEPP*: Fortsättning – Reglering av det framtida svenskt kraftsystem,* 2016
[17] Ibid
[18] Sweco: *Effektutbyggnad vattenkraft*, 2016

Typ av flexibilitet som vattenkraft kan bidra med

Det finns olika sätt att möjliggöra högre effekt i vattenkraften och därmed öka flexibiliteten i elsystemet genom vattenkraft. Syftet med att höja effekten i vattenkraftverk är att möta effektbehovet inom en viss tidsram och anpassa älvsträckor till ett nytt körmönster, för att nå en ökad flexibilitet[19].

Eftersom älvarna är utbyggda med olika stora kapaciteter i olika kraftstationer, måste vattenflödet koordineras mellan stationerna för att undvika spill samt för att säkerställa att vattnet används så fördelaktigt som möjlig med hänsyn tagen till ekonomi och miljö. Inför en kommande effekttopp kan vatten därför förtappas vid en eller flera stationer och samlas längre ned i älven, vilket senare kan möjliggöra ett högre effektuttag vid effekttoppen. Förtappningen kan ta olika lång tid, från timmar till dagar, beroende på gångtiden mellan de olika kraftverken. Hänsyn måste tas till potentiella flaskhalsar som kan uppstå längs med älven samt till utbyggnadsvattenföringen, som är det maximala totala flödet genom turbinerna i en kraftstation. Noggrant planerat är det här exempel på hur vattenkraften fungerar som en flexibel komponent i elsystemet idag.[20]

Vidare kan utökad effekt uppnås genom att bygga om aggregat i kraftstationer alternativt ersätta äldre aggregat med nya, eller att installera flera aggregat i kraftstationerna för att öka effektkapaciteten. Effekttillskott i en del av älven kan dock minska elproduktionen i andra delar av älvsystemet. Kraftstationerna som ligger högt upp i älven har större vattenmagasin både uppströms och nedströms, och har därför bättre förutsättningar för fler eller större aggregat. Här behövs det inte tas lika mycket hänsyn till hela älvsystemet men begränsningen kan komma av yttre faktorer, som till exempel kapaciteten i elnäten. Vidare kan utökad lagringskapacitet i vattenmagasinet även möjliggöra större flexibilitet i hur vattnet leds genom älven, och på så vis öka effektuttaget.[21]

Potential på kort och lång sikt

I en studie[22] utförd av Sweco undersöktes de tio största svenska älvarnas potential för effekthöjning. Resultaten visade att effekthöjningen kan uppgå till omkring 3 400 MW inom ramen för fallhöjder och genom ett ökat maxflöde genom stationerna för dessa älvar. Analysen inkluderade flertalet faktorer, med förenklingar, rörande hydrologi och tillrinning, magasin, produktionsförutsättningar kopplade till gångtider mellan stationerna och iskravning på vintern, marknadsincitament, transmission, miljö, vattendomar och dämning av vatten. Analysen inkluderade inte de små älvarna i systemet eller lönsamhetsanalys.

De tio största älvarna har en sammanlagd installerad effekt på 14 200 MW, vilket utgör 88 % av den totala installerade effekten på 16 200 MW i Sverige. En grov uppskattning med ett antagande att övriga icke-studerade älvar har samma procentuella effekthöjningspotential, 24 %, skulle resultera i en potentiell effekthöjning motsvarande totalt 3 900 MW för samtliga älvar i Sverige.

Vidare bör betonas att den fysiska kapaciteten på 3 900 MW troligtvis är högre i verkligheten eftersom älvarnas utbyggnad kan optimeras mot fler faktorer än vad studien utförligt inkluderat. Dock måste utbyggnaden även vara lönsam och fler ”ingrepp” i dagens system innebär högre kostnader.

Utmaningar

Den svenska vattenkraften är reglerad genom det europeiska Ramdirektivet för vatten och den svenska implementeringen av denna som haft en viss inverkan på dess utvecklingsmöjligheter. Tillståndsprocessen vid ombyggnation av vattenkraftverk har generellt sett varit lång och överklagats till flera instanser vilket kraftproducenterna lyft fram som ett hinder[23]. Den 1 januari 2019 trädde en ny överenskommelse i riksdagen i kraft som specifikt betonar att

[19] NEPP: *Effekthöjning i vattenkraften*, 2018
[20] Sweco: *Effektutbyggnad vattenkraft*, 2016
[21] Svensk Energi: *Potential att utveckla vattenkraften,* 2015
[22] Ibid
[23] NEPP: *Effekthöjning i vattenkraften*, 2018

”Vattenkraftens utbyggnad främst ska ske genom effekthöjning i befintliga verk med moderna miljötillstånd. Nya anläggningar ska ha moderna miljötillstånd.”, vars syfte bland annat är att underlätta och korta ner tillståndsprocesserna[24].

Vidare finns fysiska och sociala utmaningar att beakta vid effektutbyggnad av vattenkraft. De fysiska är kopplade till att hela älvsträckor måste optimeras inom vissa ramar och under vissa förutsättningar. De sociala hinder är kopplade till att älven ibland sträcker sig genom ett tätt bebott område, varvid försiktighet måste tas för att undvika samhällsskada. Det är också viktigt att närboende i området tycker att förändringarna är acceptabla, något kraftbolagen beaktar vid byggnation.[25]

Vidare finns en viss problematik kopplad till nätanslutning av utbyggnaden. De nya ledningarna måsta ha koncession och miljötillstånd, processer som kan ta väldigt lång tid. Det finns därför en poäng i att involvera elnätsbolag tidigt i processen vid en effekthöjning. Vidare bör även ett tydligare system kopplat till hur elnätsbolagen bör ta betalt eller ges ersättning upprättas.[26]

Ekonomiska förutsättningar

I en studie[27] som Sweco utfört på uppdrag av Fortum och Skellefteå kraft gjordes en kostnadsbedömning för effektutbyggnaden i Skellefteälven som visade att investeringsbeloppet skulle uppgå till cirka 1,3 miljarder SEK för att föryngra stationerna i älven och därmed öka effekten med 45 MW (tidigare 590 MW). För att bygga ut befintliga kraftstationer med nya aggregat och öka effekten i Skellefteå krafts stationer med sammanlagt 165 MW skulle kostnaden uppgå till uppskattningsvis 2 miljarder SEK. Det är osäkert i vilken utsträckning dessa siffror är applicerbara på andra älvar och kraftstationer.

I en studie[28] utförd av Sweco i år beräknades kostnaden för en effekthöjning av vattenkraften på 3 000 MW uppgå till 25 miljarder SEK.

2.1.3 Gasturbiner

Gasturbiner kännetecknas av att vara snabbstartade, mellan 2-30 minuter beroende på storlek och utförande, och finns primärt som spetsförsörjning samt ingår i den snabbt aktiverande störningsreserven som Svenska kraftnät ansvarar för. Störningsreserven består idag av en installerad effekt på omkring 1 350 MW i elområdena SE3 och SE4 bestående av gasturbiner som på högst 15 minuter ska kunna aktiveras. Syftet med störningsreserven är att säkerställa elförsörjning vid oväntat bortfall av elproduktion samt vid fel på stamnätets ledningar. Då buden på reglermarknaden inte räcker till aktiveras störningsreserven och utgör på så vis en sorts flexibel back up-reserv som ska få elsystemet i balans igen[29,30].

Typ av flexibilitet som gasturbiner kan bidra med

Då gasturbiner snabbt kan starta och nå hög effekt, är de lämpade för effekthållning och reglering av elsystemet. Gasturbiner kan vara ett viktigt bidrag för frekvenshållning i mindre integrerade system där förändringar i förbrukningar orsakar större och mer frekventa obalanser. I takt med ökad andel intermittent kraft i elsystemet kan gasturbinernas bidrag också öka.

---

[24] Sveriges Riksdag https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/arende/betankande/vattenmiljo-och-vattenkraft-mm_H501CU31/html: *Betänkande 2017/18:CU31,* 2018
[25] Ibid
[26] Ibid
[27] Sweco: *Effektutbyggnad vattenkraft*, 2016
[28] NEPP: *Färdplan fossilfri el - analysunderlag*, 2019
[29] NEPP: *Gas för effektflexibilitet i kraftproduktion,* 2019
[30] SvK: *https://www.svk.se/aktorsportalen/elmarknad/information-om-reserver/storningsreserven/*, 2019

Gasturbiner kan användas i stor skala (hundratals megawatt) och är mer uthålliga än de flesta andra reservkraftslag och energilagringsteknologier.[31]

Gasturbiner kan användas för att balansera elsystem med betydande andel intermittent produktion såsom sol och vindkraft, och gör elsystemet mer robust. Gasturbiner har även möjlighet att lösa flaskhalsar på lokal nivå genom att bidra med lokal elproduktion.[32]

Potential på kort och lång sikt

Potentialen för gasturbiner att leverera el är rent teoretiskt obegränsad. På både kort och lång sikt kan gasturbiner tänkas bidra med lokal elproduktion för att lösa flaskhalsar som uppstår i elsystemet vid exempelvis utfasning av viss kraftproduktion eller anslutning av nya anläggningar (som till exempel industri, bostäder, sjukvård). På lång sikt kan gasturbiner bidra med effekt på elsystemnivå, förutsatt att ekonomiska incitament finns.

Utmaningar

I en nyligen utförd studie[33] som undersökte tre möjliga scenarion för att uppnå en fossilfri elsektor till 2045 i Sverige, bedömdes att spetslastproduktion (modellerat som gasturbiner) behövdes för att säkerställa att Sverige, utan import från omkringliggande länder, klarar effekthållningen. I samtliga scenarion bedömdes dock att produktionen från gasturbinerna kommer vara mycket låg under ett normalår vilket innebär dåliga ekonomiska förutsättningar för att göra en sådan investering. Det här innebär ekonomiska utmaningar för gasturbiner såvida de inte ingår i någon form av kapacitetsmarknad.

Vidare finns utmaningar kopplade till infrastrukturen av gasnätet. Stamnätet för gas i Sverige är koncentrerat till Västsverige och stäcker sig från Trelleborg i söder upp till Stenungsund. I Stockholm finns ett distributionsnät som inte är kopplat till det nationella nätet. En omfattande utbyggnad av gasturbiner som ska förses av gas har därför begränsningar vad gäller val av lokalisering. Gasturbiner kan drivas på både fossil och icke-fossil olja och gas, och typer av LNG/LBG-terminaler utgör då ett alternativ för lokal elproduktion på platser som inte är i anslutning till gasnätet. Om klimatmålen ska uppfyllas förutsätts det att gasturbiner drivs på biogas eller bioolja, vilket kan vara kostnadsdrivande.

Ekonomiska förutsättningar

Kännetecknande för en gasturbin är att den både har låga investeringskostnader (CAPEX) och låga fasta driftkostnader ($OPEX_{fixed}$). Gasturbiner har dock en relativt hög rörlig kostnad, främst på grund av en relativt låg nyttjandegrad och dyra bränslen.

Baserat på en kalkyl utförd för en 150 MW gasturbin, beräknades kapitalkostnaden till 360 kr/kW och år. I dagsläget konkurrerar gasturbiner med existerande oljekondenskraftverk i effektreserven vars kostnad 2017 uppgick till 65 Mkr för 994 MW, det vill säga cirka 65 kr/kW och år.[34] Det här innebär att gasturbiner inte är konkurrenskraftiga i effektreserven idag.

Som tidigare nämnt kan nya kapacitetsmarknader och nya kapacitetsmekanismer kunna vara en möjlighet för gasturbiner att nå lönsamhet i det svenska elsystemet.

---

[31] NEPP: *Gas för effektflexibilitet i kraftproduktion*, 2019
[32] Energiforsk: *Gasens roll i det framtida energisystemet,* 2015
[33] NEPP: *Färdplan fossilfri el – analysunderlag,* 2019
[34] NEPP: *Gas för effektflexibilitet i kraftproduktion,* 2019

2.1.4 Flexibel kärnkraft

Kärnkraft har länge utgjort en baskraft i det svenska elsystemet och bidragit med omkring 40 % av elproduktionen. Huvuduppgiften för kärnkraften har varit att leverera största möjliga aktiva effekt och därmed förse elsystemet med el. Mellan åren 2012 och 2014 reglerade kärnkraften i genomsnitt 35 % på säsongsskala och är den näst största produktionskällan efter vattenkraft som bidrar till balansering av nettoförbrukningens säsongsvariationer[35], bland annat genom att den inte körs fullt ut sommartid. Kärnkraftens roll i det svenska elsystemet har varit och är fortfarande omdiskuterad. Beslut har fattats på företagsekonomisk grund att några av reaktorerna, de äldsta, ska fasas ut (där vissa reaktorer redan är utfasade). De sex yngsta reaktorerna på Ringhals (tryckvatten), i Forsmark (kokvatten) och Oskarshamn (kokvatten) kommer att fortsätta att vara i drift på idag obestämd tid.

Typ av flexibilitet som kärnkraft kan bidra med

Idag kan reaktorerna opereras med en viss flexibilitet gällande effektreglering i en flerdygnsskala men främst på säsongsskala. I ett historiskt perspektiv har grundmotivet varit att möta elefterfrågan från förbrukaren för att bibehålla balans mellan produktion och förbrukning i elsystemet under dygnets alla timmar, och det är även så kärnkraftsreaktorerna i drift idag används. När kärnkraften byggdes ut på 70- och 80-talet konstruerades de för både effektreglering och frekvensreglering men mycket av den flexibilitetsförmågan har konstruerats om till fördel för maximal energileverans.

I Sverige sker den största andelen elanvändning i södra Sverige, medan en betydande andel av elproduktionen (såsom den av vatten- och vindkraft) sker i norr. Kärnkraftens placering i södra Sverige bidrar därför även till att balansera elproduktionen över landet.[36]

Potential på kort och lång sikt

Kärnkraftens osäkra framtid gör det svårt att bedöma den långsiktiga potentialen. Tekniskt sett kan kokvattenreaktorer bidra med utökad effektreglering och frekvensreglering. Vissa anläggningar bedöms även kunna bidra med kontinuerlig frekvensreglering och en mindre variant av snabb effektökning vid frekvensstörningar i kraftsystemet. Tryckvattenreaktorer har också möjlighet att bidra med effektreglering och mindre frekvensreglering. Frekvensreglering har dock inte tillämpats i Sverige och skulle behöva noggranna analyser innan aktualisering.

Utmaningar

Kärnkraftverken har på grund av vissa tekniska omkonstruktioner samt att den har andra parametrar att optimera mot inte samma möjligheter som tidigare till flexibel drift. Utmaningar kopplade till en mer flexibel kärnkraft är främst förknippade med kostnader, men även med säkerhetsfrågor. Att driva kärnkraftsreaktorer flexibelt och variera den aktiva effekten kan medföra vibrationer som påverkar processystemen och även innebära negativa effekter på härden. Det innebär också ökat slitage på turbiner och pumpar, och mer avancerad kemikaliehantering. Hela kärnkraftsanläggningen påverkas av den flexibla driften och därmed kommer frågan om frekvensreglering att behöva behandlas av Strålsäkerhetsmyndigheten, som ansvarig tillsynsmyndighet, för säkerställande av säker drift.[37,38]

Ytterligare svårigheter kopplade till kärnkraftsanläggningarna är att dess konstruktion är anpassad till att köras i ett stabilt kraftsystem. Dessa egenskaper medför att kärnkraftsanläggningarnas produktionsförmåga och delar av djupförsvaret påverkas av de stabiliserande egenskaperna som de själva är med och bidrar till. En vidare avveckling av kärnkraftreaktorer försämrar, med andra ord, förutsättningarna för kvarlevande reaktorer, vilket också kan hindra en mer flexibel kärnkraft att växa fram.[39]

---

[35] NEPP: *Fortsättning - Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem,* 2016
[36] SvK*: Kärnkraftens roll i kraftsystemet,* 2019
[37] Ibid
[38] Elforsk*: Lastföljning i kärnkraftverk*, 2011
[39] Ibid

Ekonomiska förutsättningar

Flexibla tjänster som frekvensreglering eller en ökad användning av effektregelring kräver större ombyggnationer och modifieringar i anläggningarnas konstruktion, vilket skulle driva upp kostnaderna.

Bränslet som användas i reaktorn planeras efter körschema och placeras i härden. Att använda kärnkraft för effektreglering innebär alltid ett visst bränslespill eftersom regleringen inte är känd på förhand när bränslemängden placeras i härden. En utmaning kan vara att efterfrågan blir svår att förutse vilket kan resultera i en mindre effektiv bränsleanvändning, vilket påverkar kostnaden. Sammantaget innebär en flexibel kärnkraft i dagsläget betydande kostnader som ännu inte är kartlagda och som saknar ekonomiska incitament.[40,41]

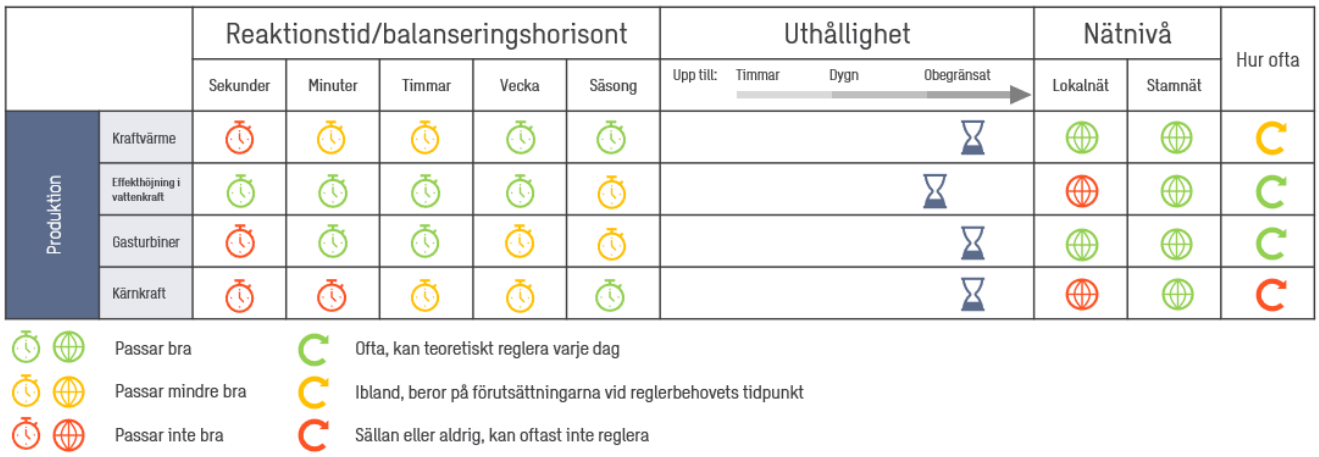
2.1.5 Sammanfattning av flexibel produktion

Sammanfattningsvis kan flexibla produktionsenheter beskrivas som uthålliga flexibilitetsresurser. Skillnader finns beroende på den enskilda teknologin:

- **Kraftvärme** har teoretiskt möjlighet att reglera upp elproduktionen inom minuter till timmar men lämpar sig bäst för reglering med åtminstone en veckas framförhållning. Vidare är det en uthållig resurs som kan drivas större delen av året. Den tillför nytta på såväl lokalnätsnivå som på stamnätsnivå.
- **Vattenkraft** kan reglera med mycket kort framförhållning från sekunder och uppåt, och en effekthöjning skulle innebära att mer effekt finns tillgänglig för flexibilitet. Mängden vatten i vattenreservoarerna samt miljöhänsyn bestämmer huvudsakligen hur mycket reglering vattenkraftsanläggningen kan bidra med men generellt sett är det en flexibilitetsresurs som balanserar på säsongsnivå i Sverige, med förmåga till flertalet upprepade svar inom korta tidsintervall. Vattenkraften tillför nytta på stamnätsnivå.
- **Gasturbiner** kan producera el med minuters framförhållning och kan teoretiskt drivas så länge bränsle tillförs, men detta är inte alltid ekonomiskt. Gasturbiner kan tillföra nytta både på lokal- och stamnätsnivå och har teoretiskt möjlighet till flera upprepade svar inom en timme, (även om det inte är rekommenderat då det innebär ökat slitage).
- **Kärnkraft** är en teknologi som generellt inte lämpar sig för reglering utifrån hur reaktorerna i Sverige idag är konstruerade, förutom i en mindre omfattning på säsongsnivå. Traditionellt har kärnkraften producerat el på maximal installerad effekt under större delen av året förutom sommartid, då den har möjlighet att reglera upp vid behov. I likhet med de andra elproduktionsenheterna är kärnkraften en resurs med hög uthållighet och tillför nytta på stamnätsnivå, men är en traditionell baslast som inte lämpar sig för upp- och nedreglering i vare sig större skala eller under korta tidshorisonter såsom timmar.

Se Figur 7 för illustrering av de flexibla produktionsenheterna.

[40] Sweco*: 100 % förnybart,* 2017
[41] Ibid



Figur 7: Sammanfattande översikt av flexibel produktion

2.2 Flexibel användning

Elanvändare kan välja att bidra med flexibilitet genom att ändra sin förbrukning givet olika styrsignaler och incitament. Denna typ av flexibilitet kallas efterfrågeflexibilitet och alla från mindre hushåll till större industrier kan i teorin bidra med denna typ av flexibilitet.

I stort kan elanvändarens flexibilitet delas upp i tre olika typer av efterfrågeflexibilitet: Elanvändaren kan öka sin elanvändning, minska den eller flytta den till en annan tidpunkt. Om elanvändare exempelvis minskar sin elanvändning då nätet som helhet är hårt belastat och ökar sin förbrukning då det finns ett energiöverskott bidrar de till att jämna ut nätets belastningsprofil och öka flexibiliteten i nätet.

I en studie gjord av Energimarknadsinspektionen[42], som sammanfattas i Tabell 1 visas att det framförallt är hushåll och elintensiv industri som har den största potentialen för att bidra med efterfrågeflexibilitet i Sverige. För den stora andelen potential som finns hos hushåll, t.ex. i form av eluppvärmda småhus, bör aktiveringen lämpligen automatiseras på ett eller annat sätt. Efterfrågeflexibiliteten hos industrin lämpar sig i dagsläget för aktivering vid få tillfällen per år under effekttoppar.

HUSHÅLL	FASTIGHETER	SERVICE-VERKSAMHET	ELINTENSIV INDUSTRI	ÖVRIG INDUSTRI
5 500 – vinter 3 000 – vår 1 500 – sommar 4 500 – höst 2 000 – medel (uppvärmning) 300 (hushållsel)	200 (ventilation)	300 (reservaggregat)	1 700 (effektreduktion eller övergång till egen elproduktion inom framförallt skogsindustrin)	300 (effektreduktion inom lätt industri såsom livsmedels- och verkstads-industri och sågverk)

Tabell 1: Nuvarande potential (MW) för efterfrågeflexibilitet i olika kundsegment i Sverige[43]

Efterfrågeflexibilitet hos hushåll, elbilar och fastigheter kan typiskt hantera förändringar i lokalnät och bidra med flaskhalshantering och systemtjänster på lokalnätsnivå. Initialt bör detta kunna göras med incitamentsskapande tariffer och senare med marknadsplatser (drivna i samarbete mellan lokal/regionnätsoperatörer och stamnätsoperatör). Hushåll och fastigheter kommer att kunna bidra med flexibilitet på ett snarlikt sätt, skillnaden ligger framförallt i vilken typ av beslutsprocesser som krävs.

Efterfrågeflexibilitet hos industri kan istället bidra till att underlätta topplastsituationer samt för att hantera flaskhalsar i region/stamnät, givet att industrin ofta har svårt att vara allt för flexibla. Det finns produkter och marknadsplatser redan idag som kan utgöra incitament för flexibilitet (spot/intra-dag, effektreserv, mFRR) men dessa kan behöva anpassas för att främja efterfrågeflexibilitet ytterligare. Till exempel skulle industriell användning kanske kunna användas för snabb frekvensreglering eller till störningsreserven då stora effektuttag teoretiskt kan kopplas bort mycket snabbt. Dock kan det vara svårt i praktiken, då industrier kan ha svårt att avvika från sin planerade produktion.

[42] Energimarknadsinspektionen*: Ei R2016:15, Åtgärder för ökad efterfrågeflexibilitet i det svenska elsystemet,* 2016

[43] Ibid

2.2.1 Efterfrågeflexibilitet hos hushåll (uppvärmning)

Elanvändningen i bostäder och servicesektorn står för drygt 50 % av den totala elanvändningen i Sverige[44]. Även om elanvändningen i ett ensamt hushåll är låg i jämförelse med stora industrier kan den aggregerade potentialen från denna sektor vara betydande och hushåll skulle därför kunna ha en viktig roll när det kommer till efterfrågeflexibilitet. Hushåll använder framförallt el till hushållets uppvärmning samt till olika hushållsapparater. Hushållsapparaterna kan antingen vara igång konstant som till exempel kylskåp eller frys, eller startas och stängas av vid behov som exempelvis tv eller diskmaskin. Dessutom finns det även ett växande antal elbilar bland hushåll som, vid laddning, utgör en stor andel av hushållens effektbehov. På sikt skulle hushållsapparaterna kunna bidra till flexibilitet genom att exempelvis diskmaskinen körs beroende på hur nätets förbrukning ser ut vid olika tidpunkter. Elbilsladdning behandlas vidare i stycke 2.2.3.

I nuläget är det dock framförallt hushållens elbaserade uppvärmningssystem som ses som den stora potentialen för efterfrågeflexibilitet bland hushåll. Precis som för hushållsapparater handlar det om att flytta elanvändning i tiden, till en tidpunkt då belastningen på elnätet är lägre. Detta kan antingen göras genom att installera styrutrustning hos hushåll där en tredje part styr upp eller ned förbrukningen givet en styrsignal, eller genom att införa prissignaler direkt till hushåll exempelvis i form av effekttariffer eller liknande.

Efterfrågeflexibilitet hos hushåll är i dagsläget en relativt outnyttjad och outforskad potential. Även om det har pratats om fenomenet i många år samt gjorts ett flertal studier på ämnet finns det relativt få reella exempel. Det finns idag ett par olika applikationer för styrning ute på marknaden, men någon storskalig implementering har ännu inte skett bland hushåll.

I Upplands Energis elnät driver Sustainable Innovation för närvarande ett projekt i samarbete med Ngenic där hushålls värmepumpar styrs, för att balansera elanvändningen i nätet och undvika effekttoppar under kalla vinterdagar. Med hjälp av 500 värmepumpar och en temperatursänkning på 1 grad, lyckades projektet minska effektuttaget med 1 MW mitt under nätets morgontopp en kall vinterdag utan att hushållen märkte någon komfortsänkning.[45] [46]

Även SvK och Fortum har gjort ett liknande pilotprojekt där 90 hushålls varmvattenberedare styrdes för att reglera balansen i elsystemet. I pilotprojektet lyckades de 90 villorna bidra med 0,1 MW som kunde budas in på marknaden för frekvensreglering (FCR-N). [47]

Typ av flexibilitet som hushåll kan bidra med

Det är svårt att jämföra efterfrågeflexibilitet med olika produktionsresurser och tekniker eftersom efterfrågeflexibiliteten i regel inte är särskilt uthållig. Efterfrågeflexibilitet hos hushåll kan typiskt bidra med flexibilitet under kortare tidsperioder, från en till ett par timmar. Detta eftersom eluppvärmda småhus endast kan flytta sin elanvändning under ett fåtal timmar för att undvika påverkan på komforten. I hushåll med direktverkande el påverkas komforten snabbare av en effektsänkning än i hushåll med vattenburen värme. Elanvändningen antas också vara återkommande, då förlorad uppvärmning kan behöva tas igen vid ett senare tillfälle.

Flexibiliteten är säsongsberoende, då värmeanvändningen hos hushållen framförallt sker under vinterhalvåret. Efterfrågeflexibilitet hos hushåll kan bidra med flexibilitet på alla nivåer i nätet.

Potential på kort och lång sikt

Ett flertal olika studier[48] har uppskattat potentialen för efterfrågeflexibilitet hos hushåll till mellan 2 000 – 5 000 MW på nationell nivå (elvärme uppskattas till mellan 7 000 - 8 000 MW vid en effekttopp). En studie av Sweco[49] visar att den

---

[44] Energimyndigheten: *Energiläget 2019 – en översikt,* 2019
[45] Sustainable innovation: https://sustainableinnovation.se/projekt/nya-samverkansmodeller-pa-energimarknaden-klok_el/ *[2019-07-12]*
[46] Energivärlden: https://www.energivarlden.se/artikel/smarta-elnat-i-uppland-far-internationellt-pris/ *[2019-07-12]*
[47] Svenska kraftnät: *Slutrapport pilotprojekt flexibla hushåll,* 2017
[48] NEPP: *Fortsättning - Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem,* 2016
[49] Konfidentiell kund, 2019

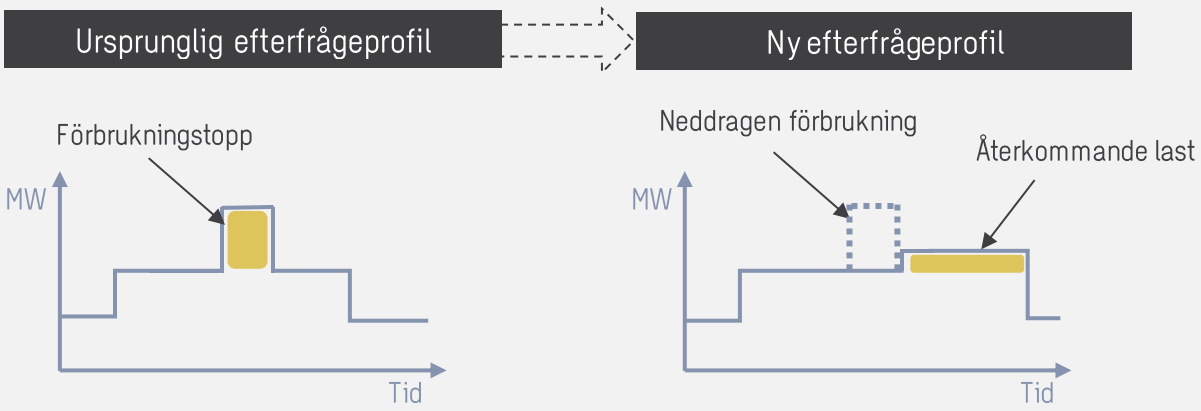
maximala potentialen per hushåll är uppemot 2,6 kW vilket innebär en potential på cirka 2 500 MW på nationell nivå för en enskild timme om en miljon villor i Sverige bidrar med sin flexibilitet. En effekttopp i nätet består dock ofta av ett flertal på varandra följande timmar med hög belastning, varpå det kan uppstå nya högre effekttoppar i efterföljande timmar om alla hushåll vill ta igen elanvändningen i timmarna efteråt. Därför, visar Swecos studie, att potentialen i praktiken snarare ligger kring 0,7 kW per hushåll (700 MW på nationell nivå). Det är dock tänkbart att smart styrning av uppvärmningssystem (och även andra komponenter) kan bidra med mer flexibilitet utan att komforten påverkas.

Det är även viktigt att nämna att potentialen är beroende av utomhustemperaturen. Värmeförbrukningen kan inte minskas utan att det finns ett värmebehov och den kan inte heller ökas om hushållet redan använder full effekt. Det innebär att potentialen är störst på vintern men även att den minskar under längre perioder med mycket kallt väder då värmesystemet troligtvis går för fullt.

Utmaningar

En utmaning som är viktig att ta hänsyn till i fallet då aktörers förbrukning styrs ned givet en styrsignal är den återkommande elanvändningen, se Figur 8. I och med att användningen styrs ned sjunker temperaturen i bostaden. När neddragningen är över kan effektbehovet från den återkommande elanvändningen till och med bli högre än den genomsnittliga efterfrågan i och med att återuppvärmningen sker från en lägre temperatur än den annars skulle ha gjorts. Sweco har tidigare gjort datadrivna analyser där ett stort antal hushålls förbrukning styrts ned samtidigt. I analyserna skapade den återkommande elanvändningen en ännu högre topp den efterföljande timmen även då den återkommande elanvändningen antogs spridas ut på de följande åtta timmarna.

I det fall en aggregator erbjuder en neddragning av elanvändning är det alltså viktigt att säkerställa att aggregatorn även hanterar den återkommande elanvändningen på något sätt. Om tillräckligt bra styrutrustning används minskar dock problemet med återkommande elanvändning. Till exempel kan en effekttariff ge incitament att hålla nere den återkommande elanvändningen under höglasttimmar. Nätbolaget kan själv åta sig rollen som aggregator eller låta en oberoende tredje part tillhandahålla denna tjänst.



Figur 8: Återkommande elanvändningvid aktivering av efterfrågeflexibilitet

Det är även viktigt att nämna att oberoende aggregatorer på den svenska elmarknaden kan orsaka problem för dagens balansansvariga aktörer. I varje leveranspunkt i elnätet ska det, enligt ellagen, finnas en balansansvarig aktör som har finansiellt ansvar för balansen mellan produktion och elanvändning. När aggregatorer flyttar elanvändning i elnätet kommer det att uppstå obalanser hos den balansansvarige i de leveranspunkter som aggregeras, vilket kan få negativa ekonomiska konsekvenser för marknadsaktörer som berörs av dessa obalanser. Om aggregatorer kommer in i stor skala på den svenska elmarknaden är det därför viktigt att det finns relevanta regelverk för denna typ av aktör.

Slutligen är relevant teknik en viktig förutsättning för att hushåll ska kunna bidra med flexibilitet. Med det menas applikationer för styrning, relevanta IT-system samt elmätare med hög mätupplösning. Idag kan av olika skäl inte den tekniska och ekonomiska potentialen för hushållens efterfrågeflexibilitet realiseras fullt ut, men i längre tidsperspektiv är denna potential högst relevant som en del av lösningen för att möta kraftsystemets balanseringsbehov.

Ekonomiska förutsättningar

NEPP har i en studie[50] uppskattat hur stor ekonomisk nytta som denna typ av efterfrågeflexibilitet kan bidra med. Studien kom fram till att kostnadsbesparingen för efterfrågeflexibilitet är i storleksordningen 490–890 kr per eluppvärmt småhus och år, uppdelat på posterna som visas i Tabell 2. Viktigt att nämna är dock att studien har ett på år på nacken och med ett sannolikt ökat behov av effektreserv och en större prisvolatilitet i framtiden kan nyttan antas öka än mer. Studien tar inte heller hänsyn till att efterfrågeflexibilitet hos hushåll kan bidra till minskade lokala kapacitetsproblem eller nyttan för ett elnätsbolag att kunna minska sitt abonnemang mot överliggande nät. Med det i åtanke underskattar studien troligtvis den ekonomiska nyttan med efterfrågeflexibilitet hos hushåll.

Potentiell nytta	Årlig kostnadsbesparing [kr]
Styrande efter elpriset (systempriset)	150–550
Besparingar i distributionsnäten	200
Ersättning av effektreserven	140
Besparingar i region- och stamnät	-
TOTAL POTENTIAL	**480–890**

Tabell 2: Potentiell ekonomisk nytta från efterfrågeflexibilitet hos eluppvärmda småhus[51]

Nyttan från att styra förbrukningen efter elpris uppskattas i nämnda studie variera med volatiliteten i elpriset mellan 150–550 kr per småhus och år. Ett minskat investeringsbehov i distributionsnäten bedöms leda till besparingar på 200 kr per hushåll och år. Även i region- och stamnät är det rimligt att anta att det tillkommer besparingar i form av minskat investeringsbehov, vilka inte kvantifierades i studien. Slutligen tillkommer även en besparing för att ersätta behovet av effektreserv, vilken kvantifierats baserat på Svenska Kraftnäts upphandlingskostnad för effektreserven (70 000 kr/MW) och en antagen neddragning av 2 000 MW. Detta beräknas ge en besparing på 140 kr per hushåll och år.

2.2.2 Efterfrågeflexibilitet hos industrin

I jämförelse med hushåll har många industrier en hög elanvändning, vilket innebär att det kan räcka med att användningen hos en eller ett par industrier styrs upp eller ned för att bidra med flexibilitet. Industrin är känslig för förändringar i elpriset och när elpriset blir för högt kan elintensiva företag stänga av elkrävande produktionsprocesser under en tid, och på det sättet dra ner på elanvändningen.

Olika typer av företag inom gruppen industrier har dock väldigt olika förutsättningar för effektstyrning beroende av hur deras produktionsprocesser ser ut. De som är mest lämpade för att styra sin elanvändning är de industrier med värmetrög elanvändning eller de som har mellanlager med buffertkapacitet i produktionen, till exempel pappersbruk.

Denna typ av efterfrågeflexibilitet nyttjas redan idag hos vissa industrier som är aktiva på elmarknaden. Bland annat kan de sälja sin flexibilitet på dagen-före marknaden eller delta i effektreserven, vilket innebär att företaget lovar att minska sin förbrukning vid behov. De aktörer som idag deltar på elmarknaden är framförallt de med en elintensiv industri, då den typen av aktörer ofta har en bättre förståelse för elmarknaden i och med att elpriset påverkar deras resultat i större skala än för annan industri.

Till vintern 2019/2020 upphandlade Svenska Kraftnät 190 MW reduktion av förbrukning till effektreserven hos fyra olika företag som alla är inom massaindustrin.

Typ av flexibilitet som industrier kan bidra med

Då industrier är en väldigt olikartad grupp är det svårt att säga något generellt om vilken typ av flexibilitet dessa industrier kan bidra med, utan det beror framförallt på vilka industriella processer som krävs i produktionen. De industriella

[50] NEPP: *Fortsättning - Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem,* 2016
[51] Ibid

processerna påverkar både hur stor effektreduktionen eller ökningen kan vara samt uthålligheten. Även reaktionstiden skiljer sig kraftigt mellan olika typer av industrier, mellan allt från ett par minuter till timmar eller dagar.

Till skillnad från för hushåll är den nedstyrda elanvändningen hos industrier inte återvändande på kort sikt. Företaget behöver dock ta igen neddragningen vid ett annat tillfälle för att upprätthålla produktionsnivån, vilket innebär att energibehovet för industriföretaget är oförändrat på längre sikt.

Potential på kort och lång sikt

Potentialen för efterfrågeflexibilitet hos industrin har i olika studier uppskattats till cirka 2 000 MW[52]. Av detta anses cirka 1 700 MW komma från elintensiv industri och resten från lätt industri. Det ska noteras att delar av denna potential finns på marknaden redan idag, exempelvis i form av de 190 MW som idag ingår i effektreserven.

Potentialen påverkas också av konjunkturläget. Under högkonjunktur är orderingången hög och då går produktionen ofta på högvarv, vilket betyder att potentialen för reducerad effekt ökar under lågkonjunktur. Det är därför sannolikt att den fulla efterfrågepotentialen från industrin enbart kan realiseras ett par gånger per år och lämpar sig därför inte för kontinuerlig balansering av kraftsystemet.

Det är svårt att säga något om hur potentialen kan utvecklas på längre sikt, eftersom det finns ett stort antal faktorer att ta hänsyn till. Inom skogsindustrin kan till exempel den mekaniska massaproduktionen komma att avta mer och mer till förmån för kemisk massaproduktion. Detta kan leda till att potentialen för efterfrågeflexibilitet minskar, eftersom den mekaniska massaproduktionen idag är den industri som framförallt bidrar med detta.

Om ekonomiska incitament skulle finnas för efterfrågeflexibilitet bedöms att intresset från industriföretag skulle öka.

Utmaningar

Det finns ett flertal anledningar till varför industrin inte kan eller vill vara flexibla. En tydlig anledning är att det kan störa produktionen, vilket kan leda till att man inte kan leverera enligt de åtaganden man har mot slutkund. Det kan också vara så att processerna är känsliga för de störningar som kan uppstå i och med neddragningar eller stopp, alternativt att slitaget på anläggningarna ökar.

Dessutom är kunskapsnivån hos industriföretag varierande, vilket kan utgöra en barriär för industrier att bidrag med efterfrågeflexibilitet.

Industriföretagen menar på att beslutet att bidra med efterfrågeflexibilitet eller inte måste vara frivilligt, att det inte får påverka möjligheterna att leverera till kund samt att det måste vara lönsamt. De påpekar även att det är svårt för industrier med ett kontinuerligt och inflexibelt effektuttag att bidra med förbrukningsflexibilitet.

Ekonomiska förutsättningar

Eftersom gruppen industrier är mycket heterogen är det också svårt att ge ett entydigt svar om ekonomiska förutsättningar för denna typ av flexibilitet. Kostnaden för ett industriföretag som bidrar med flexibilitet kan variera beroende av konjunkturläge, beläggningsgrad, orderingång och lagernivå[53]. Företagen kan också påverkas av vilka avtal de har med sina slutkunder, till exempel genom straffkostnader för sena leveranser. Ersättningen för att bidra med flexibilitet påverkar intresset och möjligheterna för efterfrågeflexibilitet hos industrin.

Sweco har inte hittat några explicita utredningar som undersöker kostnaden/nyttan av efterfrågeflexibilitet i industrin. För de företag som bidrar till effektreserven med förbrukningsneddragningar betalar Svenska kraftnät ut en administrativ ersättning för varje timme som resursen finns tillgänglig i effektreserven, och när den aktiveras betalas en rörlig ersättning. Svk rapporterar inte kostnaden för effektreserv uppdelat på typ av reserv av sekretesskäl för enskilda aktörer.

---

[52] Energimarknadsinspektionen: *Ei R2016:15, Åtgärder för ökad efterfrågeflexibilitet i det svenska elsystemet,* 2016
[53] Ibid

För perioden 2018/2019 var Svks kostnad för effektreserven (562 MW produktion och 205 MW förbrukningsreduktion) 68,1 MSEK.

Datacenter

Datacenter väntas i högre grad anläggas i Sverige i framtiden. År 2016 var den installerade effekten i datacenter 220 MW, men idag ligger siffran snarare runt 300 - 400 MW och ökar stadigt när fler och fler datacenter etableras. År 2045 uppskattas elanvändningen av serverhallar till 7 TWh[54]. Det är av intresse att undersöka om elanvändningen för datacenter kan komma bli flexibel.

Datacenter har en konstant elanvändning över dygnet och kan i sådan bemärkelse inte bidra med flexibilitet. Anläggningen har ofta en stor reservkapacitet som rent teoretiskt skulle kunna balansera elsystemet vid behov. Det kan dock tänkas att reservkraften förväntas finnas tillgänglig hela tiden ifall en störning skulle uppstå, och därmed är det troligen bara i undantagsfall som man är villig att buda bort den som flexibilitetsresurs.

Det finns diskussioner kring att ta tillvara på spillväme från datacenter och föra in i fjärrvärmesystemet. Om det i förlängningen skulle innebära att fjärrvärme ersätter elvärme, kan elbehovet och effektbehovet sänkas på det sättet. Det är inte en flexibilitetslösning i sig men en långsiktig strategi för att dra ned effekttoppar i det svenska elsystemet.

HYBRIT

Ett industriprojekt som ofta diskuteras med avseende på flexibilitet är HYBRIT. HYBRIT (Hydrogen breaktrough ironmaking technology) är ett initiativ som har startats av SSAB, LKAB och Vattenfall med målet att utveckla en process för fossilfri järn- och stålframställning genom att ersätta kol och koks med fossilfri el och vätgas. Den svenska järn- och stålindustrin ger i dagsläget upphov till cirka 10 % av de svenska koldioxidutsläppen. Genom att använda vätgas som reduktionsmedel istället för kol/koks, som används i dagens masugnprocess, kommer utsläppen från järnmalmsreduktionen i princip att elimineras. En grundförutsättning för detta är att vätgasen är framställd med fossilfri el.

För omställningen till HYBRIT krävs ungefär 15 TWh energi, vilket motsvarar cirka 10 % av Sveriges nuvarande elförbrukning. Initiativet är i dagsläget inne i en pilotfas som beräknas pågå till 2024.

I pilotfasen pågår bland annat tre pilotprojekt där teknikutveckling och utvärdering för olika teknikområden sker inför framtida uppskalning:

1. Direktreduktion av järnmalm (järnmalm omvandlas till järn) med vätgas
2. Fossilfri pelletstillverkning
3. Vätgaslagring i inklätt bergrum

Planen är att bygga en demonstrationsanläggning som ska stå färdig under 2025 så att HYBRIT därefter ska kunna producera järnmalmsbaserat fossilfritt stål för kommersiellt bruk. Vid 2035 är målet att sälja fossilfritt stål på bred front.

HYBRIT i demo-, och sedan i fullstor, skala kommer att ha en stor påverkan på elsystemet då vätgasframställningen primärt baseras på elektrolys av vatten som drivs av fossilfri el. Det stora behovet av vätgas medför anslutning av stora laster på elnätet i och med elektrolysprocesserna, vilket i sin tur ställer stora krav på elnätets kapacitet i regionen.

Dock kommer HYBRIT-processen att kunna frigöra stora mängder effekt i elsystemet genom att minska sin vätgasproduktion, i perioder med effektbrist. Det finns också möjlighet att öka elanvändningen, genom att producera extra mycket vätgas under elöverskottsperioder. I pilotprojektet ingår även att utveckla ett vätgaslager i ett bergrum, som då kan användas för flexibilitet under brist- eller överskottsperioder. Till skillnad från ett ”konventionellt” vätgaslager kommer vätgasen inte att återgå till el, utan framförallt användas till järnmalmsreduktion, vilket gör processen effektivare än om en extra omvandling hade krävts.

Det är ännu inte känt hur mycket flexibilitet som HYBRIT kommer att kunna bidra med. Om man antar att processen har en nyttjandegrad på cirka 7 500 timmar om året och att årsanvändningen av el är 15 TWh skulle den genomsnittliga

[54]NEPP: *Färdplan fossilfri el – analysunderlag,* 2019

effekten per timme vara 2 000 MW, vilket kan jämföras med Ellevios uttagsabonnemang i Stockholm som är ungefär 1 500 MW. Denna jämförelse visar att HYBRIT, utan tvekan, kommer att ha en stor påverkan på elsystemet och att processen, då den kan vara flexibel, skulle kunna bidra för att balansera kapacitetsproblematik på en relativt stor skala.

2.2.3 Smart laddning av elfordon

En annan typ av efterfrågeflexibilitet framför allt bland hushåll, men även bland yrkestrafik, är smart laddning av elfordon. Smart laddning innebär en typ av fordonsladdning som minimerar negativ påverkan på elnätet genom till exempel höga effekttoppar. Motsatsen till smart laddning är beteendestyrd laddning, vilket i stora drag innebär att man laddar sin elbil när man kommer hem från jobbet på eftermiddagen/kvällen. Denna typ av laddning riskerar att förstärka den redan höga kvällstoppen i elnäten som förekommer i de flesta svenska städer. Smart laddning kan åstadkommas genom att styra laddning mot tidpunkter då annan belastning i elnätet är lägre, generellt sett nattetid, eller då produktionen av förnybart är hög. Att andelen elbilar förväntas växa skapar möjligheter till att dessa bidrar med flexibilitet. Det kan även sägas vara näst intill en förutsättning att de laddas smart, givet den stora påverkan på effektuttag de annars skulle ha på delar av lokalnätet. Förutsättningarna för yrkestrafik är generellt annorlunda jämfört med privat trafik, där fordon för yrkestrafik oftast används mer kontinuerligt än personbilar och körs längre sträckor per år. Yrkestrafik kan därför ha mindre möjligheter att anpassa sin laddning till utvalda timmar under dygnet. Dock kan viss yrkestrafik, som exempelvis bussar för kollektivtrafik, ha goda möjligheter till depåladdning nattetid.

Så kallad styrning av elanvändning från elbilar sker redan idag och tekniken anses ha god potential att bidra med flexibilitet till elsystemet. Om smart laddning ska bidra till flexibilitet på stor skala behövs det troligtvis någon typ av aggregator som kan aggregera elanvändning från flera elbilar för att buda in flexibiliteten på olika flexibilitetsmarknader.

Ett exempel på en aggregator är företaget och elhandelsbolaget Tibber, som genom sin laddlösning erbjuder sina kunder smart laddning som styrs utifrån spotpris[55], det vill säga det dagliga priset på el. Det innebär att de schemalägger fordonsladdning till tidpunkter då elpriset är lågt, vilket oftast är de tidpunkter då den totala elanvändningen i Sverige är låg. De bedömer att elpriset är en tydlig styrsignal som är enkel att kommunicera gentemot kund, kunderna har lätt att förstå varför fordonsladdningen startar först vid midnatt när de samtidigt får information om att elpriset är lägre då än när de kommer hem från jobbet.

Typ av flexibilitet som smart laddning kan bidra med

Smart laddning kan bidra med flexibilitet genom att styra efterfrågan för att undvika att alla elbilar laddas samtidigt när det är stor belastning på nätet, alternativt att elbilarna laddas när det är ett överskott på el från förnybara källor. Elanvändning kan typiskt flyttas ett par timmar framåt (eller bakåt) i tiden. Flexibiliteten blir därmed inte särskilt uthållig.

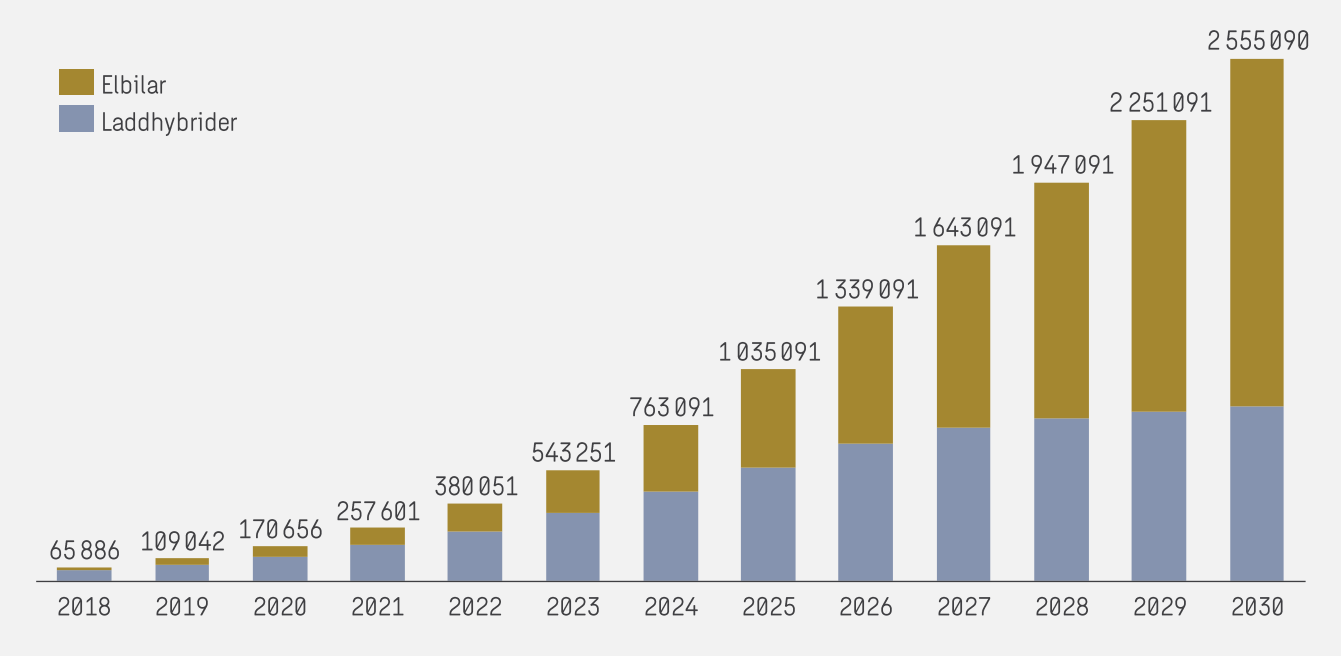
Teoretiskt skulle smart elbilsladdning med hjälp av en aggregator kunna aktiveras och deaktiveras snabbt vilket innebär att de kan bidra med snabb frekvensreglering. Detta har exempelvis testats av Tibber i ett pilotprojekt med norska Statnett. Där testade de att styra elbilarna mot en snabb frekvensreserv (FFR) och aktiveringstiden var lägre än 2 sekunder för båda testen[56].

Potential på kort och lång sikt

I och med att icke-styrd/beteendestyrd fordonsladdning ofta sker samtidigt då människors beteende ofta liknar varandras, finns god potential i att flytta denna typ av elanvändning. Laddeffekten i ett vanligt uttag är 3,7 kW och om alla elbilsförare i ett område sätter sin bil på laddning då de kommer hem efter jobbet blir den totala efterfrågan snabbt hög. Endast 100 fordon som laddas samtidigt på detta sätt har ett effektbehov på 370 kW, vilket är mycket i ett lokalnät då det finns en begränsning i vad områdets transformatorstation klarar av att överföra. I ett mindre bostadsområde på cirka 100 villor kan transformatorn ha en begränsning på under 900 kW.

[55] Tester har även gjorts att styra utifrån belastning i fördelningsstationer
[56] Statnett: *Fast Frequency Reserves 2018 – pilot for raske frekvensreserver*, 2018

Behovet av flexibel och smart laddning ökar i takt med att antalet elbilar ökar. Potentialen ökar i takt med att det kommer fler elbilar på marknaden. Figur 9 visar Power Circles prognos på utveckling av elfordon i Sverige fram till 2030. Viktigt att påpeka är dock att även om potentialen för denna typ av flexibilitet ökar med antalet elbilar så kommer den ökade elektrifieringen även leda till ett större behov av flexibilitet.



Figur 9. Prognos som visar antalet nya elbilar och laddhybrider i Sverige per år[57]

Utmaningar

Olika fordon har olika förutsättningar till smart laddning, det finns till exempel ett antal bilmodeller som idag inte går att koppla upp och därför inte kan styras på signaler som elpris eller belastning i nätet.

En utmaning kan också vara att inte alla elbilsförare är beredda att låta sig styras, det vill säga att de själva vill kunna välja när deras bil ska laddas. Generellt kan det dock sägas att de som väljer att köpa en laddbar bil idag ofta är intresserade av att delta i aktiviteter som kan bidra med samhällsnytta. Dock kvarstår vissa begränsningar i att det kan finnas en lägsta nivå av laddning som många bilägare vill ha i syfte att kunna ta bilen oplanerat åtminstone kortare sträckor.

Ekonomiska förutsättningar

De ekonomiska förutsättningarna för smart laddning har inte utretts i stor skala. I exemplet där Tibber styr sina kunders laddning mot spotpriset utlovar de en lägre elkostnad för sina kunder (cirka 50 % reduktion), genom att de betalar en månadskostnad för styrningen (cirka 39 kr/mån).

2.2.4 Sammanfattning av flexibel användning

Flexibel användning av el hos hushåll såväl som industri har potential att avlasta elnätet vid höglasttimmar i fåtalet timmar under ett dygn.

[57] Power Circle: *Elbilsläget 2018,* 2018

- **Efterfrågeflexibilitet hos hushåll** genom uppvärmningssystemet har en potential på 2 000 – 5 000 MW på nationell nivå. Den kan verka inom minuters framförhållning och är uthållig i 1-2 h, dock med en återkommande last. Den tillför nytta på lokal när som stamnät och kan upprepas mer än en gång per dygn.
- **Efterfrågeflexibilitet hos industrin** har teoretiskt stor potential men beror mycket på den specifika industrins produktionsprocess vilket försvårar en generell slutsats. Dock kan sägas att detta är en flexibilitetsresurs som verkar på timnivå, har en begränsad upprepningsförmåga och tillför nytta på stamnätsnivå.
- **Smart laddning av elfordon** kommer att behövas för att undvika att belasta elnätet under timmar då det traditionellt är högbelastat, såsom tidig morgon eller kvällstid. En metod är att via elpriset skicka signaler till kunder för att åstadkomma detta. Reaktionstiden är på sekunder till minuter och uthålligheten ett par timmar med begränsat antal upprepning under ett dygn, samt under förutsättning att elfordonet finns tillgängligt och inte används. Nyttan tillförs på lokalnäten.

Se Figur 10 för illustrering av de flexibla användarenheterna.

Figur 10: Sammanfattande översikt av flexibel användning

2.3 Energilager

2.3.1 Batterier

Batteriteknologin har generellt ett brett användningsområde och innehåller flera olika batterityper som lämpar sig olika beroende på dess syfte. Batterier kan fungera både småskaligt, i decentraliserade elsystem och i lokalnät, och i stamnätet. Batterier diskuteras idag att användas tillsammans med solcells- och vindkraftsanläggningar, där deras funktion passar väl genom att lagra överskottsel vid tillfällen av hög vind- och solelsproduktion och låg efterfrågan.

Typ av flexibilitet som batterier kan användas till

Användningsområdet för batterier inkluderar exempelvis att balansera intermittent kraftproduktion, frekvensreglering och för black-start. Responstiden är millisekunder till sekunder och batterier fungerar i kortare tidsintervall upp till ett antal timmar under ett dygn beroende på utförande. Avgörande faktorer är effekt, lagringskapacitet, urladdningsdjup och hur många laddningscyklar som förväntas under livstiden.[58,59]

Flödesbatterier och litiumjon-batterier är två exempel på batterier som kan passa som lager i elnätet. Den största skillnaden mellan de två batterityperna är att effekt- och energilagringskapaciteten för flödesbatterier är skalbara oberoende av varandra. Effekten beror på antal celler och storlek på elektroderna i det jonbrytande membranet, och energikapaciteten beror på koncentration och mängd av elektrolyt.

Litiumjon-batterier har hög effekt per viktenhet vilket har varit en stark bidragande faktor till den frekventa användningen i konsumentprodukter, en fördel som är mindre viktig för stationära applikationer. Generellt är flödesbatterier att föredra om en stor energilagringskapacitet eftersöks (eftersom det i stort endast innebär större elektrolyttankar), medan litiumjon-batterier är att föredra om kravet på energilagringskapacitet är lägre men storlek och vikt är av större roll. Litiumjon-batteriet är den överlägset dominerande tekniken och har en fortsatt kraftig tillväxt i installerad effekt, inte minst drivet av elektrifieringen i transportsektorn.[60] Vidare kan flödesbatterier lagra energi under lång tid utan degradering eller självurladdningsförluster med hjälp av elektrolyten.[61]

Potential på kort och lång sikt

På längre sikt förväntas kostnaden för batterier gå ned i takt med att teknologin blir allt mer konventionell. Potentialen för installationskapacitet kan sägas vara obegränsad.

Två exempel från utlandet där större batterier installerats i anslutning till elnätet finns i Finland och Australien. Fortum i Finland har installerat ett batteri på lokalnätsnivå i ett område som är särskilt utsatt för stormar. Batteriet har en förmåga att säkerställa elförsörjning under 24 timmar. Det ger nätoperatören tid att laga felet och samtidigt undvika kostnader för avbrottsersättningar.[62] I Australien finns två batterier på 100 respektive 120 MW kopplade till elnätet för att säkerställa elförsörjning[63]. I september 2016 drabbades södra Australien av en black-out då en storm förstörde delar av stamnätet, vilket (som i Finland) medfört ekonomiska incitament till att investera i en batterianläggning[64].

I dagsläget finns det ett fåtal exempel på batterilager i det svenska elnätet. I och med artikel 36 i EU-kommissionens Elmarknadsdirektiv (en del av Ren energipaketet) kan det dessutom bli ännu svårare för lokalnätsföretag att äga och driva energilager. Direktivet anger att nätföretag i regel inte ska äga, utveckla, förvalta eller driva energilagringsanläggningar. Undantag från regeln ska endast ges om det inte går att handla upp ett lager från tredje part till ett skäligt pris inom rimlig tid.

---

[58] Sweco: *Energilager i det svenska elsystemet*, 2016
[59] Sweco*: Energilager del 2, en rapport till Svenska Kraftnät,* 2016
[60] NEPP: *Gas för effektflexibilitet i kraftproduktion*, 2019
[61] S. Monie: *Energilagring av distribuerad produktion av solcellsel,* 2016
[62] Nordiska projekt: https://www.nordiskaprojekt.se/2018/11/27/fortum-satsar-pa-storskaliga-batterier/, 2018
[63] Ny Teknik*:* https://www.nyteknik.se/energi/nedlagda-gruvan-blir-energilager-med-tryckluft-6948775*,* 2019
[64] ABC News*:* https://www.abc.net.au/news/2018-04-06/tesla-battery-outperforms-coal-and-gas/9625726, 2018

Utmaningar

Tekniska utmaningar kopplade till litiumjon-batterier innefattar att de är begränsade i sin momentana effektkapacitet. De är temperaturkänsliga och kan överhettas på grund av dess kemiska sammansättningen och litiums brännbarhet. Vidare har litiumjon-batterier en något högre självurladdning (5 % första 24 h och sedan 3 % per månad). Cykelkapaciteten kan variera mellan 300–25 000 (flödesbatterier har generellt över 10 000) beroende på utförande. Tekniska utmaningar kopplade till flödesbatterier innefattar att de utgörs av elektrolyter i flytande form som är lagrade i separata tankar. En låg energidensitet, 50–75 kWh/m^3, kräver stora tankvolymer och utgör en begränsning i hur stor mängd energi systemet kan leverera. Elektrolyterna består ibland av giftiga ämnen som brom.[65]

Övriga utmaningar kopplade till att skala upp batterianvändandet är tillgång till hållbara och etiskt utvunna metaller, även om flera aktörer håller på att minska sitt användande. Ett exempel är kobolt som idag huvudsakligen kommer från Kongo och utgör en huvudkomponent som kan uppgå till 50 % av ett litiumjon-batteri. Prospekteringen efter metallen har dock börjat undersökas i EU och inte minst i Sverige där den hittats på flera ställen, bland annat i Bergslagen och Kiruna.[66] Svårigheten att få tillstånd för gruvbrytning i Sverige utgör dock en barriär.

Ekonomiska förutsättningar

Litiumjon-batterier är en beprövad teknik där den kraftiga expansionen inom bilindustrin bidragit till att reducera produktionskostnaderna. Ur ekonomisk synpunkt passar batterier bättre för applikationer där de används ofta, upp till flera gånger per dag.[67]

I en studie[68] utförd av IRENA beräknades kostnaden av färdig installation för ett typiskt litiumjon-batteri till strax under 600 USD/kWh (5 880 SEK/kWh) år 2016, en kostnad som väntas minska till omkring 220 USD/kWh (2 156 SEK/kWh) till år 2030. Kostnaden för ett typiskt flödesbatteri beräknades till 900 USD/kWh (8 820 SEK/kWh) år 2016 och väntades ha minskat till 280 USD/kWh (2 744 SEK/kWh) till 2030.[69] Batterier är idag fortfarande kostsamma komponenter i elsystemet.

2.3.2 Power-to-gas (vätgaslager)

Power-to-gas är ett samlingsbegrepp som innefattar flertalet processer där el används för att producera energigaser, som exempelvis vätgas. Vätgas framställs genom elektrolys av vatten, vilket innebär att el används för att spjälka vatten till vätgas och syrgas. Det är en kommersialiserad teknologi som används på flera ställen runt om i världen, där bland annat kemiindustrin är en stor framställare. Huvudsakligen finns två olika typer av elektrolysörer, alkaliska- och PEM-elektrolysörer (Proton Exchange Membrane). De alkaliska är de mest använda på marknaden men PEM ses som en vidareutveckling eftersom de är små och inte lika utrymmeskrävande.

Elektrolysören har goda möjligheter att utgöra en reglerbar elanvändning i elnätet då den omedelbart reagerar på inmatad el, oavsett eleffekt. Främsta fördelen med PEM är att de kan driftas på låga dellaster samt att de är kompakta, men har generellt något högre kostnader än alkaliska elektrolysörer. En alkalisk elektrolysör av elektroder nedsänkta i elektrolyslösning bestående av vatten och kaliumhydroxid spjälkar vatten direkt när el matas till den, förutsatt att den redan körs på dellast, vilket innebär snabb rampning och passande ur reglerkraftssynpunkt. För att uppnå full verkningsgrad kan det finnas en viss fördröjning.[70]

Independent Electricity System Operator (IESO) som ansvarar för driften av elmarknaden och elsystemet i provinsen Ontario i Kanada har genomfört ett projekt där frekvensreglering med hjälp av elektrolysör testats. Under testet kördes

---

[65] S. Monie: *Energilagring av distribuerad produktion av solcellsel,* 2016

[66] Sveriges geologiska undersökning: *https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2018/januari/kobolt--en-konfliktfylld-metall/*, 2018

[67] NEPP: *Gas för effektflexibilitet i kraftproduktion*, 2019

[68] IRENA: *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030,* 2017

[69] Växelkurs: 1 USD = 9,8 SEK

[70] Sweco: *Energilager i det svenska elsystemet,* 2016

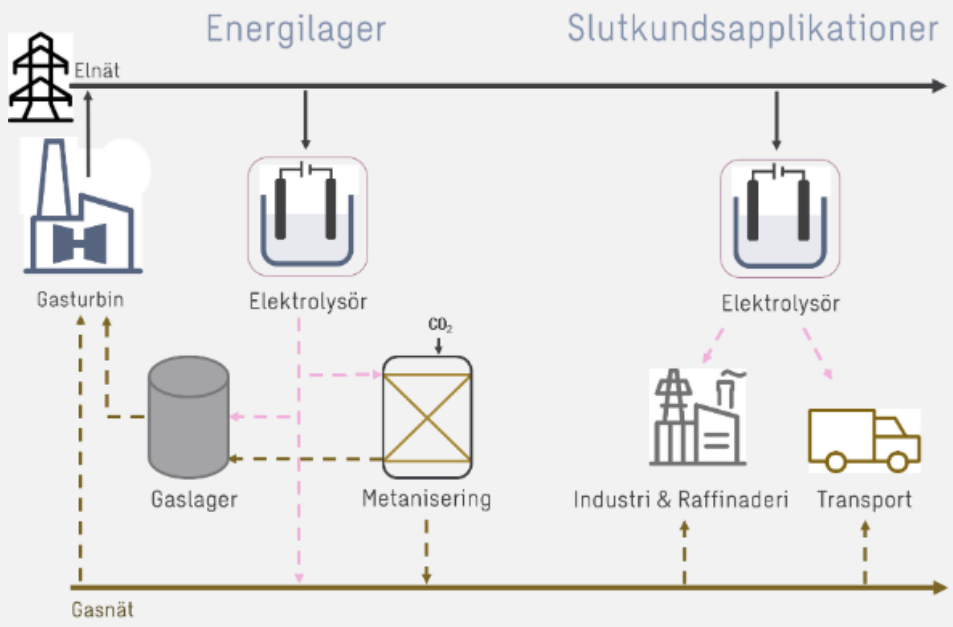
elektrolysören på 50 % av den installerade effekten för att både kunna reglera upp och ned produktionen. Testen visade på snabb responstid och god förmåga att följa referenssignalen[71,72].

Genom ytterligare en kemisk reaktion där vätgas reagerar med koldioxid kan det erhållas syntetisk metan. I slutprodukten förblir även små mängder vätgas. Koldioxiden kan komma från olika källor, som förbränningsprocesser, industriella processer eller biogasanläggningar. Syntetisk metanproduktion är en relativt obeprövad teknologi men de olika delprocesserna i konceptet är kommersiella.[73]

Typ av flexibilitet som Power-to-gas kan bidra med

Power-to-gasteknologin kan användas som en flexibel resurs genom att energi lagras i form av gas under timmar då det råder låg efterfrågan men hög produktion från intermittenta kraftslag. Överskottselen, genom elektrolysörer, spjälkar då vatten och vätgasen som produkt från processen kan senare användas som vätgas i en industriell process eller i en bränslecell för elproduktion.

I Figur 11 illustreras olika användningsområden för Power-to-gasteknologin. Användningsområdena har grovt delats upp i energilager och slutkundsapplikationer där det finns dedikerade användare för gasen. Beroende på behov och tillgänglig infrastruktur kan vätgasen användas på olika sätt. Som energilager kan vätgas omvandlas till metan som injiceras i gasnätet, eller i begränsad volym direktinjiceras i gasnätet, alternativ finnas tillgänglig i lokala lager (gäller både vätgas och metan). Gasen kan även användas för elproduktion, dock medför detta höga förluster (se vidare beskrivning under "Utmaningar"). Slutkundsapplikationer kan bland annat inkludera transport inklusive järnväg och sjöfart, raffinaderier och bioraffinaderier, ståltillverkning och cementindustrin.



Figur 11: Översikt av möjligheter att för att sammanlänka el- och gasanvändningen genom vätgasproduktion

Ur ett efterfrågeflexibilitetsperspektiv kan tillverkningen hos slutkund tillfälligt minska för att minska vätgasbehovet och därigenom elbehovet.

[71] Hydrogenics
[72] NEPP: *Gas för effektflexibilitet i kraftproduktion,* 2019
[73] Ibid

Potential på kort och lång sikt

Teoretiskt sett är potentialen för Power-to-gas obegränsad. HYBRIT-projektets långsiktiga plan och stora satsning kommer med sannolikhet innebära en vidare etablering för teknologin. Självförsörjande hus med solceller, vätgasproduktion och bränsleceller är också möjliga alternativ i framtiden när kostnaderna reducerats.

Utmaningar

Som beskrivits ovan har Power-to-gas flera användningsområden. När vätgas produceras av el för att sedan konverteras tillbaka till el är verkningsgraden låg, cirka 30 %, vilket medför svårigheter för att driva en sådan cykel på ett ekonomiskt konkurrenskraftigt sett ur ett rent eltillförselperspektiv. I en sådan konstellation krävs elektrolysörer, vätgaslager (inklusive kompressor) samt bränslecell. Förluster finns i alla led, men de största förekommer vid omvandling av el till vätgas och tvärtom.[74]

Vidare kan elbehovet för vätgasproduktion, t ex inom HYBRIT-projektet, komma att innebära en utmaning för elsystemet då det kräver stora mängder el. Bara HYBRIT-projektet ensamt uppskattas kräva cirka 15 TWh.

Ekonomiska förutsättningar

Vätgasproduktion kräver flera olika komponenter för in- och utlagring av energi. De båda huvudkomponenterna, elektrolysörerna och bränslecellen, är idag dyra komponenter. Kostnadsläget för storskalig (10 MW) elektrolysör är 9 000 kr/kW samt bränsleceller 31 000 kr/kW, vilket ger ett sammanlagt pris för dessa huvudkomponenter på ca 40 000 kr/kW[75]. Det går att reducera kostnaderna genom att endast använda elektrolysörer och inte bränslecellen. Bränslecellen är en elproduktionsenhet och uteslutande av den innebär att man inte kan återinföra el i nätet. Elektrolysören kan istället kontinuerligt köras på dellast och bidra med reglering genom att öka eller minska förbrukningen vid behov. Dellastdrift är ur ett ekonomiskt perspektiv mer fördelaktig eftersom elektrolysören är konstruerad för att köras kontinuerligt och mindre lämpad för start/stopp över tid, eftersom det ger sämre verkningsgrad och kortare livslängd. Kontinuerlig produktion innebär att vätgasen också måste nyttjas.

2.3.3 Pumpkraft

Pumpvattenkraft är teknologi där vatten pumpas upp till ett högre beläget magasin och lagras som lägesenergi, för att vid ett senare tillfälle släppas ned och producera el. Vatten kan pumpas upp i magasinen vid tillfällen då det finns överskottsel och elpriset är lågt.

Pumpvattenkraft är idag en mogen och etablerad teknologi som finns i flertalet storskaliga anläggningen runt om i världen. I Sverige har det förekommit fem pumpkraftverk (varav tre stycken är aktiva idag); Lettens kraftstation, Kymmens kraftstation, Eggsjöns kraftstation, Sillre kraftstation och Juktans kraftstation. Letten (36 MW, 65 GWh/år) och Kymmen (55 MW, 34 GWh/år) är aktiva och finns i Värmland[76]. Sillre vid Indalsälven och Juktan[77] vid Umeälven är numera konverterade till vanliga vattenkraftverk. Eggsjöns kraftverk vid Klarälven har pumpfunktion men den används sällan.

Pumpkraften är den dominerande energilagerteknologin i det svenska elsystemet idag vilket beror på de låga rörliga kostnaderna och långa livstiden[78], ihop med Sveriges goda förutsättningar för vattenkraft.

Typ av flexibilitet som pumpkraft kan bidra med

Ett pumpkraftsaggregat har alla egenskaper som ett konventionellt vattenkraftaggregat har och kan därför bidra med systemtjänster såsom reglerkraft, frekvenshållning, och tröghet/svängmassa vid både generering och pumpning.

---

[74] Information till Sweco via konfidentiell kund
[75] Information till Sweco via konfidentiell kund
[76] Sweco: *Energilager i det svenska elsystemet,* 2016
[77] Vattenfall: *https://powerplants.vattenfall.com/sv/juktan,* 2019
[78] M. Kopiez, K. Låås: *Strategic Battery Storage Integration into the Swedish Power Market*, 2018

Pumpvattenkraftens magasin är avgörande för hur uthålliga de är, oftast mellan några timmar upp till ett dygn, vilket gör de lämpliga för dygnsregelring. Flödet och fallhöjden är emellertid de avgörande faktorerna för hur hög effekt kraftanläggningen har. Pumpkraftsverkens responstid är några sekunder och de har möjlighet att producera på full effekt inom några minuter. De kan på olika sätt optimera kraftproduktion i elsystemet, bland annat genom samverkan med vindkraft där vatten som pumpas upp i vattenmagasin kan bevaras under lång tid för att portionsvis kompensera luckor i vindkraftsproduktionen.

Pumpkraftverk verkar som medium- till långtidslagring och har en låg självurladdning på max 2 % per dag. Verkningsgraden är mellan 70 % och 84 % och livstiden brukar vara mellan 40 till 60 år. Med livstidsförlängande åtgärder kan den siffran stiga till 100 år.[79]

Potential på kort och lång sikt

Det övre vattenmagasinets storlek är avgörande för hur mycket energi som pumpkraftverket lagrar. Stora vattensamlingar eller sjöar används ofta som lägre reservoarer för att reducera kostnaderna genom att undvika att bygga en reservoar. Det finns också andra tekniska möjligheter för att upprätta ett pumpkraftverk som att till exempel använda översvämmade gruvor eller håligheter i berggrunden som en lägre reservoar. På engelska refererar man till sådana kraftverk som ”underground” eller ”subsurface” pumpkraftverk, alltså underjordiska. I dagsläget finns inte några sådana kraftverk upprättade men intresset för de ökar i Europa, på grund av den ökande bristen på lämpliga platser för den traditionella pumpkraftverken, samt den mindre miljöpåverkan som underjordiska pumpkraftverk bidrar till.[80] Just nu finns planer på att bygga det första pumpkraftverket under jord på Åland.

Vidare har teknikutvecklingen av pumpturbiner på senare år gått snabbt och medfört variabel hastighet vilket ger snabbare regleringsmöjligheter. På både kort och lång sikt kan en möjlig teknisk lösning vara att installera en pump alternativt en pumpturbin vid befintliga kraftverk. En förutsättning är att kraftverket ska ligga i direkt anslutning till två reglerbara reservoarer.[81]

Exakt hur stor potential pumpkraftverken har i både en kort och lång tidshorisont är svårt att bedöma, eftersom det beror på flera faktorer kopplade till geografi, ekonomi, teknikutveckling, miljö och lagstiftning.

Utmaningar

Pumpkraftverksteknologin är välutbyggd i Europa men det finns mindre antal lämpliga plaster med stora höjdskillnader kvar, vilket begränsas ytterligare av miljöhänsyn och övriga medborgarintressen. I södra Sverige har exempelvis Vättern, med en höjdskillnad på cirka 44 meter mot Vänern, förts på tal. Men tunnelsträckningen mellan sjöarna skulle bli ca 5 mil lång, och sjöarnas olika biotoper skulle störas.[82]

Övriga utmaningar inkluderar miljömässiga restriktioner och osäkerheter hos investerare som beror av den snabbt förändrade energimarknaden. Flera projekt i Europa har ställts in på grund av dålig lönsamhet, miljöhänsyn och allmänhetens opposition.[83]

Ekonomiska förutsättningar

Traditionellt har pumpkraftverk använts för att balansera elproduktion ihop med baslast. När elpriset är billigt kan pumpkraftverken pumpa upp vatten till reservoarer. Fyllda reservoarer producerar sedan el under tidpunkter på dygnet då det råder hög efterfrågan och genererar på så vis intäkter. I ett förnybart elsystem med mycket intermittent kraft som

---

[79] IRENA*: Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030,* 2017
[80] Ibid
[81] Ibid
[82] Sweco*: Energilager i det svenska elsystemet*, 2016
[83] IRENA: *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*, 2017

vind och sol förutses elpriset vara mer volatilt. Det innebär att det vid vissa tillfällen är väldigt lågt elpris och vid andra tillfällen ett högt elpris. I ett sådant scenario kan pumpkraft generera en hög intäktström vid höga elpriser då det råder hög efterfrågan. Det finns dock en osäkerhet kring det faktum att elpriset verkligen kommer vara volatilt eftersom det kan tänkas att ju fler flexibilitetsresurser som introduceras på elmarknaden desto mindre kommer elpriset variera. Oavsett innebär det här att teknologin med sannolikhet kommer att köras annorlunda i framtiden, varför nya marknadslösningar som genererar intäkter anpassade till att reglera ett elsystem med högre andel förnybar elproduktion kan komma att behövas.[84]

Investeringskostnaderna för pumpkraftverk är främst beroende av den geografiska lokaliseringen på kraftverket och hur storskaligt det utförs. Mer specifikt bestämmer storleken, utformningen och längden på dammar och tunnlar kostnaderna för projektet. Effekten i ett pumpvattenkraftverk beror av fallhöjden och flödet, medan storleken på dammar och tunnlar bestäms av flödet. Lönsamheten i ett pumpkraftprojekt är beroende av tillgänglig fallhöjd.

Pumpen eller en turbinkonstruktion med en reversibel turbin där vatten kan köras i båda riktningarna utgör de största kostnaderna. Pumpkraftverk väntas inte ha någon större kostnadsminskning framöver då det är en mogen teknologi. Det bedöms inte ske någon signifikant vidareutveckling av den strukturella konstruktionen eller verkningsgraden. Kostnaden för en färdig installation uppgår till 20 USD/kWh (196 SEK/kWh[85]).[86]

2.3.4 Vehicle-to-grid

Vehicle-to-grid (V2G) innebär att ett laddbart fordon (elbil eller plug-in-hybrid) även används som ett energilager eller för att åstadkomma en högre efterfrågeflexibilitet. Tekniken går ut på att energi både kan tillföras till batteriet och återföras från det. Det betyder att den energi som finns lagrat i fordonet kan återföras till nätet eller användas i det egna hushållet vid exempelvis en situation med produktionsunderskott eller ett strömavbrott.

V2G är en teknik som endast är i pilotstadiet idag. Till exempel har E.ON för närvarande ett pilotprojekt där de testar tekniken i Kungsbacka kommun[87]. I ett första skede har tio laddstolpar med V2G-teknik satts upp i kommunen för att kunna ladda upp elbilarna när det är låg efterfrågan på el och ladda ur dem när det är hög efterfrågan.

Typ av flexibilitet som V2G kan bidra med

V2G kan i teorin bidra med samma typ av flexibilitet som ett vanligt batterilager. Fördelar är att det är flyttbart och att batteriet som används redan nyttjas i andra sammanhang (transport), elbilarnas batterier behöver alltså inte produceras enbart för att stabilisera elnätet.

Potential på kort och lång sikt

I likhet med smart laddning ökar potentialen för denna teknik med fler elbilar i samhället.

Utmaningar

Vehicle-to-grid kan inte utföras med alla typer av elbilar eller via en vanlig laddbox för hemmaladdning utan kräver en likriktare som kan se till att energi kan överföras i två riktningar. Idag finns ett begränsat utbud av fordon och laddboxar som klarar av det och intresset att utveckla tekniken i fordon verkar vara bristande hos biltillverkarna. Det finns dock ett antal biltillverkare som idag erbjuder fordon som fungerar för V2G-tjänster. Detta innebär en annan kostnadsbild för elbilskunderna. Dock finns det trots det kunder som verkar vara intresserade av använda sin bil på detta sätt, och drivkraften verkar vara det sociala ansvaret och känslan av att göra nytta för samhället.

---

[84] Ibid

[85] Växelkurs: 1 USD = 9,8 SEK

[86] Ibid

[87] E.ON: *https://www.eon.se/nyheter/kungsbacka-testar-ny-teknik.html*, 2019

En annan utmaning är att en högre frekvens på laddcykler i ett fordon påverkar batteriets livslängd negativt. Det väcker frågan kring vem som har ansvar att betala för det ökade batterislitaget. Detta är en kostnad som elbilsägarna troligen inte kommer att vara villiga att betala, utan den kommer antagligen att behöva hamna på en tredje part.

2.3.5 Övriga energilagringsteknologier

Det finns fler teknologier än de som hittills beskrivits i denna rapport som är möjliga energilagringsalternativ. De är olika långt ifrån kommersialisering och är olika lämpade för ökad flexibilitet i Sverige. Nedan beskrivs kort deras funktion:

- **Tryckluft:** Trycksättning av luft som komprimeras i ett lager genom eltillförsel. Vid elefterfrågan hettas den komprimerade luften upp, expanderar och leds genom en konventionell turbingenerator för att producera el. Tryckluftslagring är mekaniska system och det finns därmed en viss inbyggd tröghet vilket påverkar reaktionstider, men med mogen teknik handlar det om sekunder. Tekniken är beprövad, har en relativt låg kostnad och är lämplig för energilagringsapplikationer som kräver mycket kapacitet över en längre period.
- **Svänghjul:** Energilager genom en motor som laddas genom att en rotor spinner snabbt, och tillför energi när motorn bromsas. Svänghjulstekniken har fördelar i att den har hög effektdensitet och verkningsgrad och att lagerlösningar är skalbara. Dessutom kan effekt och energi skalas efter behov i princip oberoende av varandra. Livslängden för svänghjul är uppåt 20 år och miljöpåverkan är låg. Till teknikens nackdelar hör relativt höga investeringskostnader och låg energidensitet. Det är också kostsamt om de magnetiska kullagren behöver bytas ut, och potentiella haverier med snabb roterande delar kräver hög säkerhet på inneslutning.
- **Värmelager:** Ett termiskt energilager som lagrar värme genom hetvatten vid låg värmeefterfrågan och hög elefterfrågan. Finns även som saltbaserat (främst ihop med termiska solkraftverk) och är en kommersiell teknologi som används storskaligt och har relativt låg kostnad.
- **Superkondensatorer:** En typ av batteri som består av en elektrolyt med laddade partiklar, joner, mellan två elektroder. Det fysikaliska fenomen som utnyttjas är när en superkapacitans har ena änden varm och andra kall rusar elektroner mot den kalla sidan och elektrisk ström uppstår.[88] Den har snabb responstid och är effektiv men till höga kostnader. Den lämpar sig främst för frekvensreglering och är endast uthållig i mycket korta tidsspann.
- **Natriumsvavel-batterier:** Ett batteri som är effektivt och har hög energi- och effektdensitet. NaS-batterier har många laddningscyklar och är idag en kommersiellt tillgänglig teknologi. De begränsas dock av den höga temperaturen som processen kräver, där energi från batteriet används för att höja temperaturen och minskar på så vis mängden energi som kan omvandlas till el.
- **Supraledande energilagring:** Energilagerteknologi som lagrar energi i ett magnetfält. Den har 100 % verkningsgrad, snabb responstid, låg energitäthet och hög effekttäthet. Den är idag inte en kommersiell teknologi och har höga kostnader.
- **Kemiska föreningar som metanol, etanol med flera.**[89,90]

2.3.6 Sammanfattning av energilager

Sammanfattningsvis kan energilager beskrivas som en flexibilitetsresurs med kort reaktionstid som lämpar sig för att balansera i minuter till timmar. Skillnader finns beroende på den enskilda teknologin:

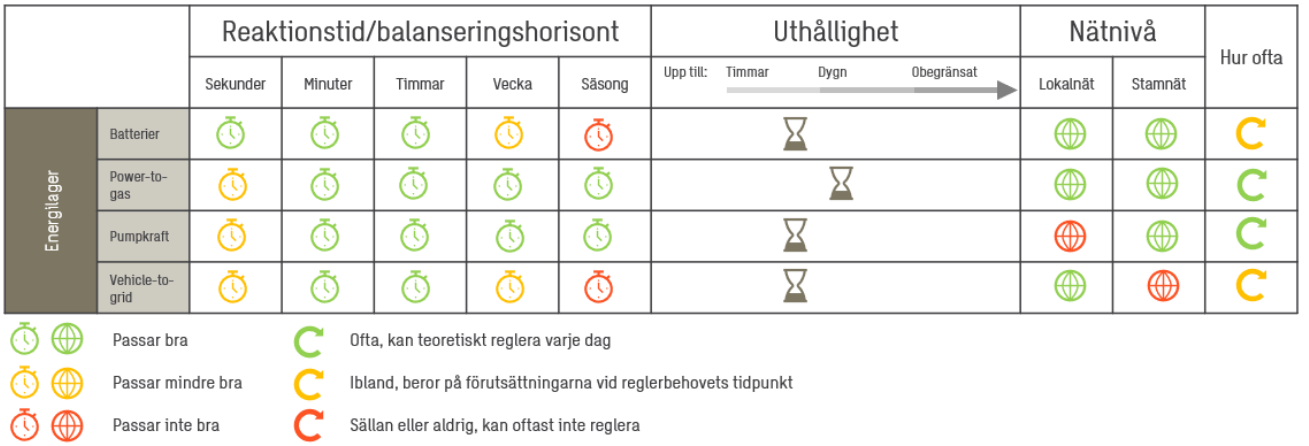
- **Batterier** finns i flera variationer men har generellt en snabb reaktionstid på millisekunder. De lämpar sig för reglering under minuter upp till timmar, kan anslutas till både lokalnät och stamnät och har förmåga till flera upprepade svar inom korta tidsperioder ner på timnivå, förutsatt att de är laddade.

---

[88] Forskning.se*: https://www.forskning.se/2016/03/11/effektiv-energilagring-med-ny-superkondensator/*, 2016
[89] Power Circle: *Energilager i energisystemet,* 2014
[90] Sweco*: Energilager i det svenska elsystemet,* 2016

- **Power-to-gas och vätgaslager** har god förmåga till att bidra med reglering i elsystemet genom att elektrolysörerna inom sekunder börja producera vätgas. Vätgaslagret möjliggör balansering på säsongsnivå och vid exempelvis behov av elproduktion kan gasturbiner drivna på vätgas balansera på tim- till dygnsnivå. Nytta skapas på såväl lokalnätsnivå som på stamnätsnivå.
- **Pumpkraft** lagrar energi genom vattenreservoarerna och bidrar med systemtjänster såsom reglerkraft, frekvenshållning, och tröghet/svängmassa både när el produceras och när vatten pumpas upp till reservoarerna. De lämpar sig främst för dygnsreglering, har kort responstid och tillför nytta på stamnätsnivå.
- **Vehicle-to-grid** innebär samma flexibilitetsmöjligheter som batterier med undantag att det är ett flyttbart energilager. Ekonomiska utmaningar kan komma kopplas till att det behövs en likriktare som kan se till att energi kan överföras i två riktningar och att högre frekvens på laddcykler i ett fordon påverkar batteriets livslängd negativt. Detta är en flexibilitetsresurs vars potential ökar i samma takt som fler elbilar ökar i fordonsflottan under förutsättning att många elbilsägare är villiga att låta batteriet laddas upp och ur i flexibilitetssyfte, något som innebär högre slitage.

Se Figur 12 för illustrering av energilagerenheterna.



Figur 12: Sammanfattande översikt av energilager

3 Slutsatser

Swecos syntesframställning visar att samtliga analyserade produktionsresurser har goda egenskaper i form av uthållighet, och kan drivas större delen av året. Kraftvärme har förmåga att reglera inom timmars marginal, främst för effektreglering men i mindre mån även för begränsad upprepande frekvensreglering. Kraftvärme tillför nytta både till lokalnätet och stamnätet, och modifieras på flera olika sätt för att öka elproduktionen. Effekthöjningen i vattenkraften bidrar till såväl effektreglering som frekvensreglering med snabb respons och möjlighet till upprepade svar under korta tidperioder. Den har potential att bidra med 3 900 MW, eller mer om ekonomiska förutsättningar finns. Gasturbiner är snabbstartade, kan bidra med effekt- och frekvensreglering och hjälper att avvärja flaskhalsar lokalt i elnätet. Deras teoretiska potential är obegränsad men är idag ekonomiskt utmanade. Kärnkraften idag är en mindre flexibel resurs som sannolikt inte passar för flexibilitetssyfte eftersom kostnaderna bedöms bli för höga. De stora produktionskällorna, vattenkraften och kärnkraften, är i regel kopplade till stamnät och regionnät och tillför därför inte nytta lokalt i elnätet utan avhjälper effektbrist på nationell nivå.

Efterfrågeflexibilitet har begränsningar i uthållighet, då en neddragning eller flytt av elanvändning ofta är tillgänglig bara ett par timmar. Potentialen är teoretiskt ganska hög för efterfrågeflexibilitet hos både hushåll och industrier. Dock är det viktigt att påpeka att om industrier har möjlighet att bidra med flexibilitet gäller det oftast endast en eller ett fåtal gånger per år, och troligen kommer inte alla industrier att kunna bidra samtidigt. Efterfrågeflexibilitet hos hushåll kopplad till uppvärmning är framförallt tillgänglig under vinterhalvåret då det finns ett värmebehov, medan smart laddning kan utföras under hela året.

Energilagerteknologierna är uthålliga i timmar upp till dygn. De har generellt snabb responstid och dess balanseringshorisont är bred. Batterier är snabba, bidrar med både effekt- och frekvensreglering, och kan kopplas till lokalnätet såväl som stamnätet. De befinner sig på god väg mot kommersialisering. Power-to-gas är en teknologi som har stor potential i och med HYBRIT-projektet. Den har snabb responstid och möjlighet till upprepande svar inom en kort tidsperiod. Pumpkraft har goda egenskaper att verka som flexibilitetsresurs och fungerar på samma sätt som konventionell vattenkraft med det undantag att vatten även kan pumpas mellan magasinen. Vehicle-to-grid är idag en obeprövad teknologi där marknadsincitament med mera behöver komma på plats innan den kan utnyttjas i större skala. Samtliga flexibilitetsresurser är bedömda utifrån deras nuvarande teknikläge, utan hänsyn till huruvida de används för flexibilitet i stor skala idag eller inte.

Produktionsresurser och vissa sorters energilager kan i generella drag beskrivas som lämpliga för säsongsbalansering, medan efterfrågeflexibilitet fungerar på en dygnsskala. Det finns undantag i jämförelserna mellan teknologier. Till exempel kan vattenkraften reglera frekvent fram till att det övre magasinet töms ut, vilket beror på vattensamlingens storlek och väderförhållanden. En gasturbin kan teoretiskt leverera el så länge bränsle tillförs men att driva gasturbiner i allt för lång tid är inte lönsamt. Om kraftvärme ska leverera mer el under ett tillfälle behöver det samordnas med värmeefterfrågan. Vidare måste ett batteri vara laddat för att generera el. De olika teknologierna har olika förutsättningar, och deras förutsättningar vid reglerbehovets tidpunkt är avgörande för hur mycket eller hur lite flexibilitet de kan tillföra elsystemet. Teknologierna är kompletterande av varandra och deras potential går att utnyttja vid olika tidstillfällen samt i olika tidsramar.

På nästkommande sida visas en sammanställande matris av samtliga studerade flexibilitetsresurser. ***Flexibilitetsmatrisen*** visar detaljerat hur de olika flexibilitetsresurserna presterar i de definierade flexibilitetsdimensionerna.

FLEXIBILITETSMATRIS

		Reaktionstid/balanseringshorisont					Uthållighet	Nätnivå		Hur ofta
		Sekunder	Minuter	Timmar	Vecka	Säsong	Upp till: Timmar / Dygn / Obegränsat	Lokalnät	Stamnät	
Produktion	Kraftvärme	Passar inte bra	Passar mindre bra	Passar mindre bra	Passar bra	Passar bra	Obegränsat	Passar bra	Passar bra	Ofta
	Effekthöjning i vattenkraft	Passar bra	Passar bra	Passar bra	Passar bra	Passar mindre bra	Obegränsat	Passar inte bra	Passar bra	Ofta
	Gasturbiner	Passar inte bra	Passar bra	Passar bra	Passar mindre bra	Passar mindre bra	Obegränsat	Passar bra	Passar bra	Ofta
	Kärnkraft	Passar inte bra	Passar inte bra	Passar mindre bra	Passar mindre bra	Passar bra	Obegränsat	Passar inte bra	Passar bra	Sällan eller aldrig
Efterfrågeflexibilitet	Hushåll	Passar inte bra	Passar bra	Passar bra	Passar inte bra	Passar inte bra	Timmar	Passar bra	Passar bra	Ibland
	Industri	Passar inte bra	Passar mindre bra	Passar bra	Passar inte bra	Passar inte bra	Timmar	Passar mindre bra	Passar bra	Sällan eller aldrig
	Smart laddning	Passar mindre bra	Passar bra	Passar bra	Passar inte bra	Passar inte bra	Timmar / Dygn	Passar bra	Passar inte bra	Ibland
Energilager	Batterier	Passar bra	Passar bra	Passar bra	Passar mindre bra	Passar inte bra	Timmar / Dygn	Passar bra	Passar bra	Ibland
	Power-to-gas	Passar mindre bra	Passar bra	Passar bra	Passar bra	Passar bra	Dygn / Obegränsat	Passar bra	Passar bra	Ofta
	Pumpkraft	Passar mindre bra	Passar bra	Passar bra	Passar bra	Passar bra	Timmar / Dygn	Passar inte bra	Passar bra	Ofta
	Vehicle-to-grid	Passar mindre bra	Passar bra	Passar bra	Passar mindre bra	Passar inte bra	Timmar / Dygn	Passar bra	Passar inte bra	Ibland

Passar bra — Ofta, kan teoretiskt reglera varje dag

Passar mindre bra — Ibland, beror på förutsättningarna vid reglerbehovets tidpunkt

Passar inte bra — Sällan eller aldrig, kan oftast inte reglera

SWECO