



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPPTEC STS 15024

Examensarbete 30 hp  
Augusti 2015

# Förbrukningsflexibilitetens potential och påverkan på kraftsystemet

Med fokus på automatisk frekvensreglering  
genom styrning av kylskåp

---

Sandra Ly  
Linda Thell



UPPSALA  
UNIVERSITET

Teknisk- naturvetenskaplig fakultet  
UTH-enheten

Besöksadress:  
Ångströmlaboratoriet  
Lägerhyddsvägen 1  
Hus 4, Plan 0

Postadress:  
Box 536  
751 21 Uppsala

Telefon:  
018 – 471 30 03

Telefax:  
018 – 471 30 00

Hemsida:  
<http://www.teknat.uu.se/student>

## Abstract

### **The potential of demand response and its impact on the power system, with focus on fridges as automatic frequency control reserves**

*Sandra Ly, Linda Thell*

Increased use of variable energy and integration of electricity markets in the European Union have led to new challenges when balancing supply and demand in the grid. Load management is a possible way to manage these challenges by adjusting electricity consumption in order to balance the power system. Household appliances can be used for this purpose, for example by providing automatic frequency control.

The aim of this master thesis is to investigate the potential of load management from private households and to examine how the power system is affected by a more flexible electricity consumption. The thesis focuses on fridges as automatic frequency control reserves and the ability of fridges to balance the power system. Attributes such as capacity, activation time, persistence and the effect of load reconnection has been modelled in Simulink, Matlab. Complementary interviews with actors from the electricity industry have been done to summarize their insights on demand response.

The results indicate that fridges can be used as a part of the automatic frequency controlled reserve FCR-N, based on assumptions made in this study. However, current requirements imposed on balancing resources are not fully met by the fridges. In order for household appliances to provide the needed flexibility, some requirements might need to be rephrased. The results also show that the capacity for providing balancing services differs for positive and negative imbalances, as consumption can be reduced with 30 MW and increased with 66 MW. When controlling the fridges by moving the reference temperature, there is a risk that the appliances will synchronize with each other, i.e. reconnect or disconnect at the same time, resulting in frequency oscillations. It is therefore important that load management is designed to avoid this kind of behavior.

Handledare: Christer Bäck  
Ämnesgranskare: Bengt Carlsson  
Examinator: Elisabet Andrésdóttir  
ISSN: 1650-8319, UPTEC STS 15024  
Tryckt av: Uppsala universitet

# Sammanfattning

Prognoser visar att andelen förnybar energi fortsatt kommer att öka i det svenska kraftsystemet, framförallt från vindkraft som är ett variabelt kraftslag. Detta kommer att medföra nya utmaningar och påfrestningar på kraftsystemet. Eftersom det alltid måste råda balans mellan elproduktion och elförbrukning så kommer behovet av reglerresurser att öka i takt med vindkraftens utbyggnad. Reglerresurser används i syfte att balansera produktion och förbrukning i driftskedet och utgörs i dagsläget främst av produktionsresurser i form av vattenkraft. Som ett mått på om det råder balans mellan produktion och förbrukning i kraftsystemet kan frekvensen användas. Frekvensen i det nordiska elsystemet ska hållas nära 50 Hz och när det uppstår obalanser i elnätet kan systemoperatörerna köpa eller sälja el för att minska frekvensavvikelserna. Om frekvensen är för låg måste den regleras upp. Uppreglering innebär antingen ökad elproduktion eller minskad elförbrukning. På motsvarande sätt kan elproduktion minskas eller elförbrukningen ökas för att reglera ner frekvensen (nedreglering). Det finns en potential att reglera obalanser i kraftsystemet genom att anpassa förbrukningen, så kallad förbrukningsflexibilitet. Styrning av hushållsapparaters förbrukning är en sådan möjlighet. För att elkonsumenten ska påverkas så lite som möjligt kan hushållsapparater som har någon slags värmeenergi, som värmepumpar, kylskåp och frysar styras. Tidigare studier har visat att kylskåp och frysar i svenska hushåll har en potential på upp till 300 MW.

Detta examensarbete har genomförts i samarbete med affärsverket Svenska kraftnät under våren 2015. Syftet med studien var att undersöka potentialen för förbrukningsflexibilitet bland privata hushåll samt att undersöka hur det svenska kraftsystemet påverkas av laststyrning. Examensarbetet fokuserar på automatisk frekvensreglering av kylskåp och studien utfördes genom att utveckla en modell i programmet Matlab. Kylskåpen antas ha kompressorer med två lägen, AV eller PÅ. Det innebär att kylskåpet konsumerar energi när kompressorn är på. En styrenhet (chip) som känner av frekvensen på elnätet kan installeras i kylskåpen som därmed kan stängas av eller sättas på beroende på frekvensavvikelsen. Modellen utformades genom att den önskade temperaturen i kylskåpet ändras beroende på nätfrekvensen. Om frekvensen är under 50 Hz kan kylskåpens referenstemperatur höjas för att låta kylskåpens kompressorer arbeta kortare än vid normaldrift. Som komplement till modellen utfördes även intervjuer med respondenter inom elbranschen.

Resultat från studien visar att reglerkapaciteten är asymmetrisk, eftersom kompressorn är avstängd oftare än den är påslagen. Detta medför att reglerkapaciteten för uppregering är -30 MW och kapaciteten för nedreglering är 66 MW. Eftersom reglerkapaciteten är större för nedreglering, är aktiveringstiden också snabbare för nedreglering. Däremot kan kylskåpen bidra med maximalt effektbidrag under en längre tid för uppregering eftersom kylskåpet kyls ned snabbare än det värms upp.

För reglerprodukter ställs ett flertal krav på bland annat hur snabbt reglerprodukterna kan aktiveras och hur länge de kan bidra med effekt. Dagens krav på aktiveringstid och uthållighet kan behöva omformuleras för att kylskåp ska kunna användas som reglerprodukt. Undersökning av kontinuerliga obalanser indikerar att kylskåpen kan reglera små, kontinuerliga störningar i kraftsystemet och fungerar därför väl som en del av normaldriftsregleringen (FCR-N). Ett viktigt resultat från simuleringarna är att kylskåpens cykler riskerar att hamna i fas när kylskåpens referenstemperatur når sitt max- eller minvärde. Detta medför att många kylskåp är påslagna respektive avstängda samtidigt vilket leder till större frekvensavvikelser. Det är därför vitalt att utforma en styrning som undviker detta.

Aktörer i elbranschen antyder att det kan finnas motstridiga motiv till att styra laster, om behoven för laststyrning ser olika ut lokalt och systemmässigt. Potentialen för förbrukningsflexibilitet där kunderna själva styr sin förbrukning anses vara liten på grund av för små ekonomiska incitament. Stora möjligheter har däremot identifierats med att styra förbrukningen för att upprätthålla ett driftsäkert system eftersom behovet av reglerprodukter ökar.

## Förord

Detta examensarbete är skrivet för Uppsala universitet och har utförts i samarbete med affärsverket Svenska kraftnät. Arbetet utgör den sista delen av civilingenjörsutbildningen System i teknik och samhälle. Författarna har utfört examensarbetet tillsammans och har varit lika ansvariga och delaktiga i samtliga moment i studien. I detta arbete har Urban Lundin varit ämnesgranskare för Sandra Ly och Bengt Carlsson har varit ämnesgranskare för Linda Thell, båda vid Uppsala universitet. Vi vill tacka er båda för råd och stöd.

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare Christer Bäck och Maria Eriksson på Svenska kraftnät för möjligheten att utföra en intressant och lärorik studie samt värdefull vägledning under arbetets gång. Ett varmt tack riktas till Andreas Westberg på Svenska kraftnät som bistått med inspiration, kunskap och ovärderlig återkoppling. Tack också till de personer som ställt upp på intervjuer och möten och som avsatt tid och visat intresse för vårt examensarbete. Slutligen vill vi tacka alla trevliga kollegor på Svenska kraftnät som svarat på våra frågor och bidragit till en trevlig arbetsmiljö.

Sandra Ly  
Linda Thell

*Sundbyberg, juni 2015*

## Ordlista/definitioner

**Aggregerad förbrukningsflexibilitet:** Elförbrukningen hos ett flertal mindre enheter slås ihop till en större volym som styrs efter ett behov.

**Aggregator:** Ett företag som specialiserar sig på att styra och sälja vidare aggregerad förbrukningsflexibilitet.

**Balansansvarig aktör:** Utför planeringsarbete så att produktion av el ska motsvara förväntad konsumtion. Om obalanser mellan köpt och använd el uppstår får de balansansvariga stå för kostnaderna för att balansera kraftsystemet.

**Dimensionerande fel:** Det bortfall av enskild huvudkomponent som ger störst konsekvens i kraftsystemet.

**Effekt och energi:** Effekt och energi är båda viktiga begrepp för kraftsystemets funktion. Effekt anges i enheten Watt (W) och är det som gör att exempelvis en lampa lyser. När lampan har lyst i en timme har den förbrukat en viss energivolym i Wattimmar (Wh). Effekt kan också beskrivas som förmågan i ett system medan energi är ett mått på uthålligheten i ett system.

**Effektreserv:** Reserv som garanterar effektbalans vid extrem elförbrukning. Består av produktionskapacitet och förbrukningsreduktion som upphandlas årligen för perioden 16 nov - 15 mars.

**FCR-N:** Frekvensstyrd normaldriftsreserv, används som primärreglering och aktiveras automatiskt då frekvensen avviker från 50 Hz. FCR-N syftar till att balansera nätet vid små, snabba och slumpartade förändringar.

**FCR-D:** Frekvensstyrd störningsreserv, används som primärreglering vid plötsliga större störningar.

**FRR-A (LFC):** Automatisk frekvensstyrd störningsreserv som styrs centralt och används som sekundärreglering.

**FRR-M:** Manuell aktiv reserv som används som sekundärreglering. Består av kommersiella reglerkraftbud på reglerkraftmarknaden och en snabb aktiv störningsreserv (gasturbiner).

**Flaskhals:** Kapacitetsbegränsning i elnätet.

**Frekvensberoende last:** Last som har en naturlig stabiliserande effekt på kraftsystemets balans, dvs. om frekvensen ökar så ökar effekten.

**Förbrukningsflexibilitet:** Förbrukningsflexibilitet innebär att kunder kan anpassa sin elförbrukning vid en viss tidpunkt. Detta kan utformas på olika sätt, exempelvis genom flexibel prissättning, avtalad effektreduktion eller tvingad laststyrning.

**Gångtid:** Tiden då ett kylskåp är på och förbrukar energi kallas gångtid.

**Nedreglering:** Minskad produktion eller ökad förbrukning

**N-1 kriteriet:** Innebär att kraftsystemet ska vara driftsäkert för bortfall av en enskild huvudkomponent.

**Referenstemperatur:** Referenstemperatur är den temperatur som ett kylskåp får variera kring med hjälp av ett max-värde som inte får överstigas och ett min-värde som inte får understigas

**Reglerbud:** Bud för upp- eller nedreglering där effekt och pris anges.

**Reglerkraft:** Reglerresurser som används för att balansera kraftsystemet bidrar med reglerkraft.

**Reglerreserv:** En samling reglerresurser med likvärdiga och definierade prestandaegenskaper (aktiveringstid, uthållighet etc) med syfte att säkerställa driftsäkerheten.

**Reglerresurs:** Avser produktions- eller förbrukningsresurs som kan justeras vid behov för att balansera kraftsystemet.

**Systemets rörelseenergi (svängmassa):** Alla roterande maskiner (generatorer och motorer) som är direktanslutna till det synkrona nätet bidrar med rotationsenergi, sk. svängmassa. Svängmassa kan ses som en naturlig reglerresurs.

**Systemansvarig:** Även kallad TSO (eng. Transmission System Operator). Den som har systemansvaret för ett eller flera delsystem i kraftsystemet. Svenska kraftnät är systemoperatör i Sverige.

**Uppreglering:** Ökad produktion eller minskad förbrukning.

# Innehållsförteckning

1.	Inledning .....	7
1.1	Syfte och frågeställningar .....	7
1.2	Avgränsningar .....	8
2.	Introduktion till elsystemet .....	9
2.1	Elmarknaden.....	9
2.2	Frekvensreglering och reglerresurser .....	10
2.2.1	Primärreglering.....	12
2.2.2	Sekundärreglering.....	12
2.2.3	Systemets rörelseenergi (svängmassa) .....	13
2.2.4	Tidsavvikelse .....	13
2.2.5	Behov av reglerresurser .....	13
2.3	Förbrukningsflexibilitet .....	16
2.3.1	Nätkod Demand Connection Code .....	17
2.3.2	Förbrukningsflexibilitetens potential .....	19
2.3.3	Pilotprojekt och tidigare studier .....	21
3.	Teori.....	23
3.1	Kylskåp.....	23
3.1.1	Värmeöverföring kylskåp .....	25
3.2	Elnätet .....	26
4.	Metod.....	28
4.1	Modellering .....	28
4.1.1	Regulatorn.....	30
4.1.2	Kylskåpen.....	31
4.1.3	Elnätet.....	35
4.2	Intervjuer .....	36
5.	Simulering av frekvensstyrda kylskåp som reglerprodukt.....	37
5.1	Kylskåpens potential för laststyrning.....	37
5.1.1	Reglerkapacitet.....	37
5.1.2	Aktiveringstid.....	38
5.1.3	Uthållighet .....	39
5.2	Påverkan på kraftsystemet.....	39
5.2.1	Kontinuerlig obalans.....	40
5.2.2	Stegstörning .....	41
5.3	Känslighetsanalys.....	45
5.3.1	K-värde .....	45
5.3.2	Anslutningseffekt och gångtid.....	46

5.3.3	Temperatursvängning och referenstemperaturens gränser .....	47
5.4	Sammanfattning av simuleringar .....	48
6.	Erfarenheter från elbranschens aktörer .....	49
6.1	Möjligheter och svårigheter med styrning .....	49
6.2	Förbrukningsflexibilitet som reglerprodukt .....	51
6.3	Påverkan på kraftsystemet.....	53
6.4	Sammanfattning av intervjustudie .....	55
7.	Analys och diskussion .....	56
8.	Slutsats .....	62
	Referenser .....	63
	Appendix A.....	67
	Appendix B.....	68
	Appendix C.....	69

# 1. Inledning

Omställningen till ett mer miljövänligt energisystem på EU-nivå främjar bland annat anslutning av förnybar, variabel elproduktion och elektrifiering av värme och transportsektorn. Detta medför ett elkraftsystem som är mer komplext att planera, balansera, styra och övervaka. Behovet av flexibilitet ökar därför i systemet (Export Group 3, 2015).

Prognoserna för elproduktion visar på en fortsatt ökning av förnybar energi även i det svenska kraftsystemet, framförallt från vindkraft (Svenska kraftnät, 2013b). Detta kommer att medföra nya utmaningar och ökade påfrestningar på kraftsystemet, bland annat eftersom vindkraften är ett variabelt kraftslag som inte kan anpassas efter förbrukningen på samma sätt som traditionella kraftslag. Då det alltid måste råda balans mellan produktion och förbrukning av el så kommer behovet av reglerresurser, som används i syfte att balansera produktion och förbrukning i driftskedet, att öka i takt med vindkraftens utbyggnad (Svenska kraftnät, 2013a). Idag utgörs reglerresurserna främst av produktionsresurser i form av vattenkraft men genom att anpassa förbrukningen, med så kallad *förbrukningsflexibilitet*, kan förbrukningsresurser också användas för frekvensreglering (Bäck, 2015).

Utöver systemfördelarna med att använda förbrukningsflexibilitet för att balansera kraftsystemet och säkerställa driftsäkerheten finns möjligheter att jämnare förbrukningsmönstret över dygnet. En jämnare förbrukning har miljömässiga såväl som ekonomiska fördelar eftersom de produktionslag som används när förbrukningen är som störst ofta är koldioxidintensiva och dyra. Dessutom minskar förlusterna och slitaget på elnätet om förbrukningstopparna kan kapas (Bartusch, 2011). Flexibla tjänster från konsumenter möjliggör därmed för elleverantörer att optimera sin produktionsportfölj, nätägare att skjuta upp och undvika investeringskostnader och systemansvariga att balansera systemet och hantera begränsningar på ett mer effektivt sätt till en lägre kostnad (Export Group 3, 2015).

I många byggnader finns möjlighet till styrning av förbrukning i form av hushållsapparater. En möjlighet är automatisk frekvensstyrning av hushållsapparater som arbetar inom ett visst temperaturspann. Exempel på sådana apparater är värmepumpar, direktverkande elvärme, ventilationsanläggningar, kylskåp och frysar. Denna rapport undersöker möjligheterna att tillämpa automatisk frekvensstyrning av kylskåp i Sverige. Tidigare studier har visat att kylskåp och frysar i svenska hushåll har en potential på upp till 300 MW, vilket är mer än Sveriges frekvensstyrda normaldriftsreserv i dagsläget (Elforsk, 2013).

## 1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med examensarbetet är att utreda potentialen för förbrukningsflexibilitet bland privata hushåll och undersöka hur det svenska kraftsystemet påverkas av att förbrukningen styrs. Detta görs genom att undersöka automatisk frekvensreglering från

kylskåp genom simuleringar i Matlab. Studien berör även olika sätt att utforma laststyrning av kylskåp. Möjligheter och svårigheter med en ökad förbrukningsflexibilitet samt konsekvenser för systemansvarig och balansansvariga aktörer undersöks också. Examensarbetet avser besvara följande frågeställningar:

- Hur stora kan variationerna i förbrukning från kylskåp bli, det vill säga hur stor effekt kan potentiellt styras?
- Vilka reglerreserver kan förbrukningsflexibilitet från kylskåp erbjuda?
- Vilken påverkan har laststyrning på kraftsystemet?

## 1.2 Avgränsningar

Analysen utförs på det svenska kraftsystemet, som är en del av det nordiska synkronsystemet. Detta eftersom simuleringarna baseras på antaganden om och statistik framtagen för svenska hushåll.

Fokus ligger på förbrukningsflexibilitet med syftet att reglera nätfrekvensen men lastförflyttning av andra motiv behandlas också. Spänningsreglering med hjälp av till- och fränkoppling av elförbrukning är också möjlig men undersöks inte i denna studie.

Studien avgränsas till att undersöka hur väl kylskåp i svenska hushåll kan fungera som reglerresurs. Hur kylskåpen eventuellt skulle samspela med vattenkraften som reglerresurs undersöks inte. I en inledande litteraturstudie framkom det att flera typer av laststyrning existerar, vilket diskuteras i rapporten. Simuleringarna avgränsas dock till en typ av styrning, vilket är att referenstemperaturen förflyttas i förhållande till frekvensavvikelsen. Antaganden om kylskåpens egenskaper görs också.

Intervjuer med aktörer inom elbranschen genomfördes för att kartlägga deras åsikter om förbrukningsflexibilitet. Dessa aktörer förväntas ha en roll i marknadsutformningen för förbrukningsflexibilitet och därför diskuteras marknadslösningar kortfattat. Diskussionerna avgränsades till aktörernas uppfattningar om vilka marknadslösningar som kan bli aktuella. Studien omfattar dock inte någon fortsatt utredning kring utveckling av marknadslösningar.

## 2. Introduktion till elsystemet

Det svenska elnätet är uppdelat i stamnät, regionnät och lokalnät. Stamnätet transporterar stora mängder el från de stora kraftverken till regionnäten via högspänningsledningar. Från de regionala näten överförs el på lägre spänningar till lokalnäten som slutligen levererar elen till slutanvändarna. De lokala näten kallas även för distributionsnät och transporterar el över kortare avstånd (Svenska kraftnät, 2011b). I detta avsnitt ges en introduktion till elsystemet. Elmarknaden, frekvensreglering och reglerresurser samt förbrukningsflexibilitet beskrivs.

### 2.1 Elmarknaden

Det finns ett antal faktorer för en välfungerande elmarknad: ett driftsäkert elnät som kan överföra önskad mängd el, en nättariff som tillåter samtliga marknadsaktörer att använda hela nätet oavsett var elen tas ut samt att det råder balans mellan produktion och förbrukning i elsystemet (Svenska kraftnät, 2011a). Den svenska elmarknaden avreglerades år 1996 med syftet att öka konkurrensen på elmarknaden och för att ge kunderna större valfrihet. Sedan dess har handeln med el ökat och medfört större effektflöden genom Sverige. Eftersom det produceras mer el än det förbrukas i norra Sverige och omvänt förhållande råder i södra Sverige, måste elen överföras långa sträckor (Svenska kraftnät, 2015a). På grund av begränsningar i elnätets överföringskapacitet kan flaskhalsar uppstå. För att hantera dessa överföringsbegränsningar på ett marknadsanpassat sätt delas Sverige in i fyra elområden, där skilda elpriser kan uppstå beroende på efterfrågan på el i området, utbud av el i området och handelskapaciteten till området (Svenska kraftnät, 2011b).

I samband med avregleringen skapades den nordiska elbörsen Nord Pool Spot som ägs av de nordiska och baltiska systemoperatörerna. På Nord Pool Spot finns en finansiell marknad samt en tvådelad fysisk marknad som består av Elspot och Elbas. Den finansiella terminsmarknaden avser elhandel på lång sikt och här kan aktörer säkra ett pris på en viss mängd el genom långsiktiga kontrakt. Elspot är en "day-ahead"-marknad där fysisk handel sker för varje timme på dygnet, ett dygn i förväg. På Elspot sätts systempriset (spotpriset) utifrån utbud och efterfrågan på el samt överföringsbegränsningar mellan elområden. Elbas, eller "intraday"-marknaden, är en kortsiktig justermarknad för fysisk handel som öppnar två timmar efter att spotmarknaden stängts. På Elbas kan de balansansvariga aktörerna justera eventuella obalanser som uppkommit i deras kraftportfölj, vilket kan göras fram till en timme före drifttimmen. Huvuddelen av all producerad el säljs på spotmarknaden medan en mindre del sker med bilaterala avtal mellan aktörer (Svenska kraftnät, 2011a). Vid sidan av Nord Pool Spot finns Reglerkraftmarknaden, en s.k. "intra-hour"-marknad, där systemoperatörerna kan köpa eller sälja el för att hantera obalanser eller för att reglera flöden i nätet (Svenska kraftnät, 2013a). Systemoperatörerna köper reglerkraft för att reglera upp ett underbalanserat kraftsystem, dvs. då frekvensen är låg. Uppreglering innebär antingen ökad elproduktion eller minskad elförbrukning. På motsvarande sätt

säljer systemoperatörerna reglerkraft för att de balansansvariga ska reglera ner sin produktion eller öka förbrukning när kraftsystemet är överbalanserat (Svenska kraftnät, 2012b). De balansansvariga aktörerna kan lämna in bud för upp- och nedreglering fram till 45 minuter innan drifttimmen. Vid obalanser avropas de inkomna buden i prisordning, där de lägsta buden avropas först (Energimyndigheten, 2013a). Kravet på budstorlek är 5 MW i elområde 4 och 10 MW i elområde 1-3 (Energimyndigheten, 2014).

Under vinterhalvåret, när elförbrukningen är som högst, upphandlar Svenska kraftnät en effektreserv som ska kunna aktiveras vid behov för att säkerställa en god effektillgång och minska risken för effektbrist (Svenska kraftnät, 2014). Figur 1 nedan beskriver hur handeln med el går till i kronologisk ordning.



Figur 1. Handeln med el på den nordiska marknaden.

Sveriges utbyte av el med andra nordiska och europeiska länder har ökat de senaste åren, vilket innebär större flöden genom Sverige. Via växelströmsförbindelser är det svenska elsystemet synkront sammankopplat med elsystemen i Norge, Finland och Östdanmark (Eriksson & Sandwall, 2014). Ett synkronområde har alltid samma frekvens (Persic, 2007). Balansregleringen inom det nordiska synkrona kraftsystemet sker på ett samordnat sätt mellan systemansvariga för respektive land (Svenska kraftnät, 2011a). Ett utökat samarbete mellan europeiska länder ska främja en gemensam elmarknad inom Europeiska Unionen (EU). EU:s målsättning är bland annat att minska klimatutsläpp och öka användandet av förnybar energi. Gränsöverskridande integrering av elnät bedöms medföra en ökad försörjningstrygghet och en mer effektiv användning av resurser (Energimyndigheten, 2014).

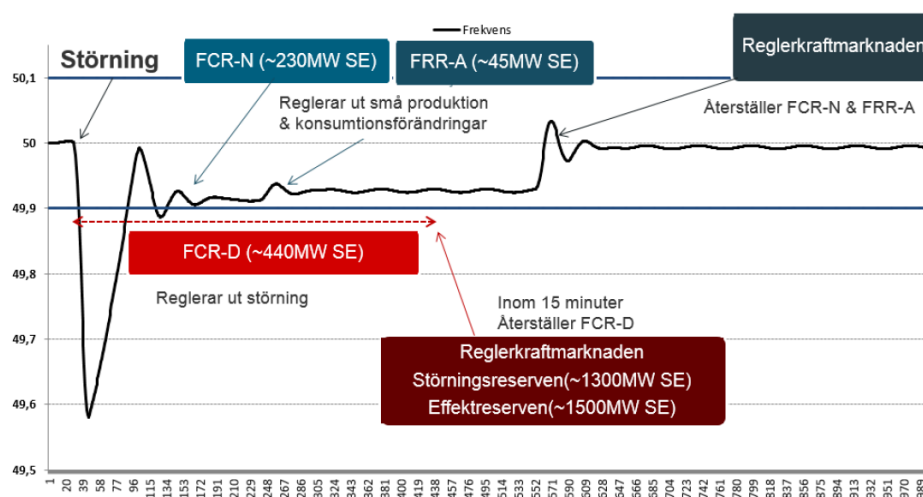
## 2.2 Frekvensreglering och reglerresurser

För att reglera den fysiska balansen i elsystemet används frekvensen som en styrparameter. När frekvensen hålls kring samma värde är det jämvikt mellan produktion och förbrukning av el. I det nordiska kraftsystemet ska frekvensen hållas nära 50 Hz (Svenska kraftnät, 2011a). Frekvensen på elnätet tillåts variera mellan 49,9

Hz och 50,1 Hz. Enligt ellagen ska det finnas ett balansansvarigt företag för all el som levereras till slutkund. Varje sådant företag tecknar ett avtal om balansansvar med Svenska kraftnät. Detta innebär att den balansansvarige ska lämna information om produktionsplaner och prognoser på förbrukning för kommande dygn till Svenska kraftnät (Svenska kraftnät, 2011a). I driftskedet går balansansvaret över till Svenska kraftnät och de andra nordiska systemoperatörerna. Systemoperatörerna ser då till att kraftsystemet är i balans genom att köpa in eller sälja el på reglerkraftmarknaden. En avräkning som baseras på planer och inrapporterade mätvärden görs efter varje timme, där kostnaderna för obalanser fördelas mellan de balansansvariga företag som orsakat obalanser i kraftsystemet (Energimyndigheten, 2013a).

En reglerresurs kan vara en förbrukningsresurs eller produktionsresurs som justeras vid behov för att balansera produktion och förbrukning i driftskedet. En samling reglerresurser av olika typ och med likvärdig prestanda kan kallas för en reserv. Med prestanda avses egenskaper som bl.a. aktiveringstid och uthållighet. Reglerresurser och reserver kan antingen aktiveras automatiskt eller manuellt. Vattenkraften som är billig, förnybar och relativt enkel att styra, utgör en stor del av de nordiska reglerresurserna (Svenska kraftnät, 2013a).

Då frekvensen avviker från 50 Hz aktiveras olika reglerreserver, vilket illustreras grafiskt i Figur 2. Den frekvensstyrda störningsreserven FCR-D (eng. frequency containment reserve for disturbances) stabiliserar frekvensen efter en större störning och den frekvensstyrda normaldriftsreserven FCR-N (eng. frequency containment reserve for normal operation) reglerar ut små produktions- och konsumtionsförändringar. Den automatiska frekvensstyrda störningsreserven FRR-A (eng. automatic frequency restoration reserve) och den manuella aktiva reserven FRR-M (eng. manual frequency restoration reserve) återställer frekvensen (Nilsson, 2015).



Figur 2. Illustration av frekvensens förlopp vid en driftstörning (Nilsson, 2015)

### 2.2.1 Primärreglering

Primärregleringen utgörs av två automatiska reserver: frekvensstyrd normaldriftsreserv (FCR-N) och frekvensstyrd störningsreserv (FCR-D). Vid små, snabba och slumpartade förändringar i förbrukning eller produktion aktiveras FCR-N för att reducera avvikelserna genom upp- eller nedreglering. FCR-N aktiveras för frekvensavvikelser som är mindre än 0,1 Hz, vid större störningar än så aktiveras istället FCR-D (Svenska kraftnät, 2012b). Tekniska krav på den automatiska frekvensregleringen har utformats utifrån vattenkraftens förutsättningar (Bäck, 2015). FCR-N upphandlas på timbasis, vilket innebär att resursen ska kunna vara aktiverad under en timme. För FCR-D är kravet på uthållighet 15 minuter (Bäck, 2015). Ett annat krav på FCR-N är att reglerprodukten ska vara aktiverad till 63 % inom 60 sekunder och 100 % inom 3 minuter (Svenska kraftnät, 2012b). Vid större, oförutsedda störningar (t.ex. bortfall av kraftproduktion) där frekvensen understiger 49,9 Hz aktiveras FCR-D automatiskt. Om frekvensen sjunker till 49,5 Hz ska FCR-D vara utreglerad till 50 % inom 5 sekunder och helt aktiverad efter 30 sekunder (Svenska kraftnät, 2012b). På grund av försämrad frekvenskvalitet överanvänds störningsreserven idag, trots att den endast ska aktiveras vid sällsynta störningar (Douglass, et al., 2013).

Svenska kraftnät ansvarar för upphandling av reglerresurser, där en del av FCR-behovet upphandlas två dagar före leveransdygnet och kompletterande upphandling av FCR sker kvällen före leveransdygnet. I Norden finns i dagsläget ett kapacitetskrav på minst 600 MW för FCR-N, där anskaffningsansvaret är fördelat mellan de nordiska systemoperatörerna utifrån den årliga elförbrukningen. Det svenska kraftsystemet ska bidra med ca 230 MW. Det nordiska kravet på FCR-D beror på aktuell dimensionerande fel där det största dimensionerande felet i Sverige är 1400 MW. Även FCR-D fördelas mellan de nordiska systemoperatörerna, varav Sverige bidrar med ca 400 MW (Svenska kraftnät, 2012b).

### 2.2.2 Sekundärreglering

Primärregleringen medför att frekvensen stabiliseras på en nivå som är skild från 50 Hz och för att avlasta primärregleringen och återställa frekvensen till 50 Hz används sekundärregleringen. Sekundärreglering utgörs av två produkter: en automatisk frekvensstyrd störningsreserv (FRR-A) och en manuell aktiv reserv (FRR-M). FRR-A är en centralstyrd produkt som aktiveras automatiskt då frekvensen avviker från 50 Hz och syftar till att avlasta FCR-N (Svenska kraftnät, 2013c). FRR-A är tillgänglig för aktivering på vardagar under maximalt fem timmar, varav tre timmar under topplasten på morgonen och två timmar på kvällen. Under sommarmånaderna är FRR-A inaktiv (Bäck, 2015). Ett tekniskt krav på FRR-A är att reserven ska vara fullständigt aktiverad inom 120 sekunder. Även FRR-A upphandlas per timme (Svenska kraftnät, 2012b). Den manuella aktiva reserven FRR-M består av en snabb aktiv störningsreserv samt kommersiella reglerbud på reglerkraftmarknaden (Svenska kraftnät, 2013c). Storleken på denna reserv bestäms av det dimensionerande felet. För att återigen kunna hantera ett N-1 bortfall, det vill säga att kraftsystemet ska vara driftsäkert för bortfall av en enskild

huvudkomponent, måste FCR-D återställas senast 15 minuter efter att ett dimensionerat fel inträffat. Detta görs genom att reglerbud avropas på reglerkraftsmarknaden. Kontinuerlig återställning av FCR-N sker också genom att upp- och nedregleringsbud avropas på reglerkraftsmarknaden (Svenska kraftnät, 2013a).

### **2.2.3 Systemets rörelseenergi (svängmassa)**

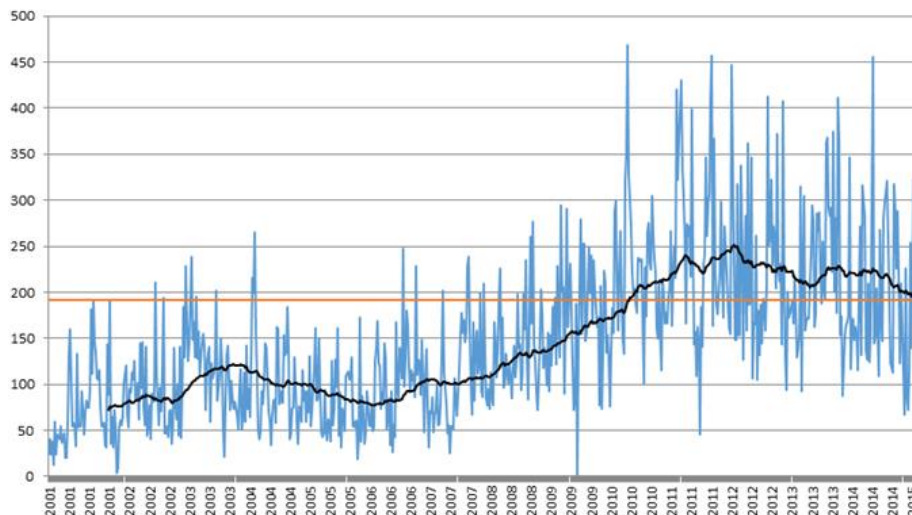
Rörelseenergi, i vissa sammanhang benämnd svängmassa, finns i alla roterande maskiner som är synkront anslutna till det synkrona kraftsystemet. Svängmassa kan ses som en naturlig reglerresurs och kan i viss utsträckning användas för att stävja plötsliga obalanser i produktion eller konsumtion eftersom den avgör hur snabbt frekvensen initialt ändras samt hur stora variationerna hinner bli. Inga krav finns formulerade gällande andel svängmassa som ska finnas i kraftsystemet. Större delen av befintliga vindkraftverk ansluts till elnätet via kraftelektronikutrustning och är inte synkront anslutna. Därför kan en stor utbyggnad av vindkraften förväntas minska den momentana svängmassan i kraftsystemet (Svenska kraftnät, 2013a).

### **2.2.4 Tidsavvikelse**

Tidsavvikelse är skillnaden mellan astronomisk tid och ett synkronur drivet av frekvensen i kraftsystemet (Svenska kraftnät, 2012b). Om frekvensen har avvikit från 50 Hz under en tid så kommer den elektriska tiden att skilja från den astronomiska tiden. Tidsavvikelsen får maximalt vara 30 sekunder vilket innebär att frekvensen inte får avvika mer åt något håll under en längre tid, utan ska vara ungefär 50 Hz i genomsnitt. Om gränsen överskrids görs regleringar för att återställa tidsavvikelsen. Den viktigaste anledningen till kriteriet för tidsavvikelse är att vattennivån i vattenkraftsmagasinen som används för att reglera frekvensen ska vara symmetrisk (Bäck, 2015).

### **2.2.5 Behov av reglerresurser**

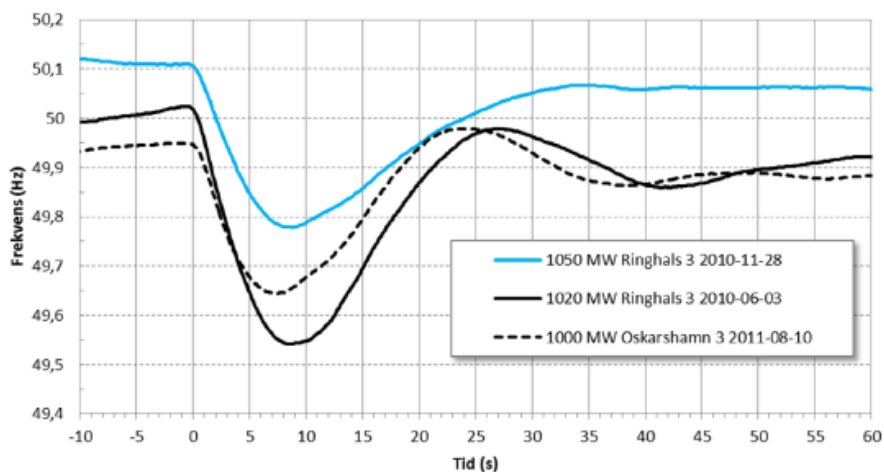
Avvikelserna från den nominella frekvensen 50 Hz har ökat sedan mitten på 2000-talet, från 50 minuter per vecka till över 200 minuter per vecka, se Figur 3. Den sammanlagda tiden med avvikande frekvens väntas öka ytterligare i och med utvecklingen av elmarknaden och kraftsystemet i form av fler HVDC-anslutningar till kontinenten samt en ökad andel ej planerbar produktion (Westberg, 2012).



*Figur 3. Antal minuter som frekvensen avviker från nominell frekvens 50 Hz mellan år 2001-2015. Den blå linjen visar minuter med frekvensavvikelse och den orangea linjen visar målet om 10 000 min/år. Den svarta linjen visar genomsnittlig frekvensavvikelse (Svenska kraftnät, 2015b)*

Svenska kraftnäts utvecklingsplan för 2025 arbetar utifrån antagandet att vindkraftsproduktionen väntas bli mellan 17-20 TWh (Svenska kraftnät, 2013b). Framtidsscenarioet med 17 TWh motsvarar en installerad effekt på 7000 MW, vilket kan jämföras med de knappt 4000 MW som var installerade i slutet av 2012. Vid detta scenario väntas behovet av sekundärreglering att öka med mellan 500-1400 MW i jämförelse med dagens kapacitet på ungefär 1800 MW och behovet av FCR-N väntas öka med 60 MW (Svenska kraftnät, 2013a). Om förbrukningsflexibiliteten kan frigöra primärresurser i form av vattenkraft så skulle vattenkraften istället kunna användas för att tillgodose det ökade behovet av sekundärreglering (Westberg, 2015).

På sikt kan en ökning av förnybara energikällor innebära att den totala svängmassan i det synkrona nätet minskar. Denna problematik illustreras i Figur 4 där tre större produktionsbortfall av samma storleksordning ger olika utslag på frekvensen beroende på varierande svängmassa i systemet (Svenska kraftnät, 2013a).



*Figur 4 Frånfall av produktionsanläggningar av samma storleksordning ger olika utslag på frekvensen beroende på varierande svängmassa i systemet. Frekvensen sjunker mer då svängmassan är liten (Svenska kraftnät, 2013a)*

Figur 4 visar att obalans mellan produktion och förbrukning ger större utslag på frekvensen i ett system med lite svängmassa jämfört med ett system med mer svängmassa. Hur lågt frekvensen sjunker vid ett momentant produktionsbortfall påverkas även av förbrukningens frekvensberoende och hur snabbt primärregleringen tar vid (Svenska kraftnät, 2013a).

Av den el som produceras i Sverige står kärnkraften för 40 % (Energimyndigheten, 2013b). Kärnkraften bidrar inte med aktiv frekvensreglering men den bidrar mycket till systemets svängmassa och har hög tillgänglighet (Energimyndigheten, 2013a). Således är det svårt att ersätta detta med variabel ej planerbar produktion som har en mycket lägre tillgänglighet. Den närmaste tiden väntas nya effekthöjningar genomföras inom kärnkraftproduktionen i Sverige vilket talar emot en nedläggning av kärnkraften på kort sikt (Svenska kraftnät, 2013a). Samtidigt har Vattenfall ändrat de planerade drifttiderna för Ringhals 1 och 2 på grund av ökade kostnader och sämre lönsamhet, vilket innebär att reaktorerna kan komma att stängas redan 2018-2020 (Vattenfall, 2015). Utvecklingen på längre sikt är än mer osäker. Den tekniska livslängden för en kärnkraftsreaktor är mellan 40 - 60 år och enligt ett riksdagsbeslut får staten inte subventionera nya kärnkraftsreaktorer (Svenska kraftnät, 2013a). Enligt Christer Bäck som arbetar på Svenska kraftnäts driftavdelning är incitamenten för privata investeringar i ny kärnkraft små (Bäck, 2015). En avveckling av kärnkraften kan påverka frekvensregleringen om de ersättande produktionsslagen inte bidrar med lika stor svängmassa (Energimyndigheten, 2013a).

Vattenkraften medför möjligheter att hantera en större mängd variabel elproduktion i Sverige men möjligheterna begränsas av en ökad efterfrågan att exportera reglerkraft till andra länder. Den ökade efterfrågan på reglerkraft beror i sin tur på integreringen av elmarknader och en ökad andel ej planerbar kraft i Europa. Därför väntas behovet av en

mer flexibel förbrukning att öka (Broberg, et al., 2014). Dessutom indikerar beräkningar gjorda av Elforsk (12:73) att om den totala mängden vindkraft överstiger 30 TWh fordras ca 11 000 MW reglerkraft, vilket överstiger vattenkraftens maximala reglerkapacitet på 10 000 MW, detta sett till skillnaderna mellan högsta förbrukning på vintern och lägsta förbrukning på sommaren. Under kortare tidsintervall är regleringen från vattenkraften än mer begränsad, inom en timme kan den maximalt reglera ca 3 500 MW och under fyra timmar maximalt ca 6 500 MW (Elforsk, 2013).

En annan faktor som kan påverka tillgängligheten av reglerkraft är Vattenverksamhetsutredningens delbetänkande SOU 2013:69, som föreslår att äldre tillstånd för vattenverksamheter ska nyprövas enligt miljöbalken. Prövningen ska ske som att verksamheten vore helt ny och innebär att äldre tillstånd kan avslås, avvisas eller återkallas (SOU, 2013). Enligt Jesper Nyberg som arbetar på Svenska kraftnäts driftavdelning kan detta medföra att reglerförmågan för vattenkraften begränsas och att mängden reglerkraft som vattenkraften kan bistå med minskar (Nyberg, 2015).

Som nämnts kommer behovet av reservkraftverk att öka men redan idag krävs subventioner i form av effektreserven för att förhindra att sådana kraftverk läggs ned (Elforsk, 2013). Enligt gällande förordning om effektreserven planeras effektreserven att avvecklas i takt med att en ytterligare fördjupad integration med andra länder sker, att mer förnybar energi integreras i kraftsystemet samt att mer förbrukningsreduktion upphandlas (Svenska kraftnät, 2013a). Avveckling av effektreserven är tänkt att ske stegvis till år 2020 och övergå till en marknadslösning med ökad användning av förbrukningsflexibilitet som styrs av smarta applikationer. Följaktligen blir hushållens bidrag alltmer viktigt (Energimyndigheten, 2013a).

## 2.3 Förbrukningsflexibilitet

Förbrukningsflexibilitet kan utformas på olika sätt, exempelvis genom flexibel prissättning, avtalad effektreduktion eller tvingad laststyrning (Broberg, et al., 2014). Utformningen brukar delas in i två kategorier, systembaserad och prisbaserad styrning. Då systembaserad styrning används skapas incitament för konsumenterna att styra sin förbrukning vid kapacitetsbrist, obalans eller ovanligt höga elpriser. Fördelar för systemoperatören utöver möjligheten att undvika kapacitetsbrist eller obalans är att kostnader till följd av elavbrott, underhåll och investeringar delvis kan undvikas eller skjutas upp om effekttoppar kapas. Prisbaserad utformning av förbrukningsflexibilitet använder differentierad prissättning utifrån hur lastkurvan varierar (Bartusch, 2011).

Flexibiliteten ska kunna tillhandahållas på kapacitets-, day-ahead-, intraday- och balansmarknaden men i dagsläget är möjligheterna att erbjuda flexibilitet på dessa marknader begränsad (Export Group 3, 2015). Marknaderna har historiskt sett utgjorts av produktionsbud och frekvensreglering har skett genom att öka eller minska elproduktion för att möta efterfrågan på el. Frekvensreglering genom bortkoppling av industrilast används idag vid större störningar men förbrukningsflexibilitet möjliggör även för små elkunder att bidra med frekvensreglering (Broberg, et al., 2014).

### 2.3.1 Nätkod Demand Connection Code

EU-kommissionen har tagit fram ett nytt regelverk med nätkoder som innebär gemensamma krav för elnätet, så kallade Framework Guidelines and Network Codes. Arbetet med nätkoderna är i olika faser och implementeringen kommer att ske successivt och varje medlemsstat i EU blir direkt bundna till nätkoderna när dessa träder i kraft (Energimyndigheten, 2014). Samtliga nätkoder är kopplade till varandra och överlappar i viss utsträckning. En nätkod som har direkt påverkan på denna studie är nätkoden DCC (Network Code on Demand Connection) som initierades för att definiera gemensamma krav på anslutning av förbrukning till elnätet (ENTSO-E, 2012b).

Nätkoden DCC ska genom ökad förbrukningsflexibilitet främja integreringen av förnybara energikällor, upprätthålla ett driftsäkert kraftsystem samt skapa en intern marknad för el. De krav som ställs i koden gäller bl.a. förbrukare och distributionsnät som är kopplade till stamnätet samt förbrukningsflexibilitet. Förbrukningsflexibilitet, eller Demand Side Response (DSR) är ett verktyg som tillåter systemoperatörerna att möta förändringar i kraftsystemet genom att reglera med hjälp av förbrukning (Energimarknadsinspektionen, 2013). Olika sätt att hantera förbrukningsflexibilitet har föreslagits i nätkoden som inte är beslutad ännu. Krav på DSR eller frivilligt deltagande med DSR har föreslagits som alternativ. Om DSR inte ställs som ett krav i DCC-koden öppnas möjligheten för marknadslösningar och dessutom kan kunden själv välja om denne vill ändra sin förbrukning. Vid frivilligt DSR-deltagande kan krav sedan ställas på de användare som erbjudit möjlig lastfrånkoppling. En nackdel med att låta marknaden styra är att deltagandet av DSR blir lägre (ENTSO-E, 2012b).

Om DSR görs obligatoriskt föreslås en tjänst med kontroll över systemfrekvensen för normaldriftsreglering, DSR SFC (eng. demand side response system frequency control). DSR SFC innebär tekniska krav för att förbereda automatisk styrning av nya hushållsapparater med hänsyn till nätfrekvensen. Koden omfattar hushållsapparater som har någon typ av termisk energi, exempelvis kylskåp, frysar, luftkonditionering och värmepumpar. Sådana apparater kyls och värms för att uppnå en önskad temperatur och därför är elförbrukningen i dessa apparater proportionell mot hur temperaturen regleras. En automatisk styrning av hushållsapparater kräver en viss teknologi och skulle kunna ge en överskådlig bild av den mängd effekt som DSR tillhandahåller. Regleringen skulle i så fall ske med hjälp av ett chip som automatiskt stänger av eller sätter på apparaten beroende på frekvensen i elnätet. På så sätt kan apparatens elförbrukning minskas eller ökas för att balansera den totala lasten i kraftsystemet och därmed reducera variationerna i nätfrekvensen. Ett krav som skulle behöva ställas på dessa chip är att hushållsapparaternas primära funktion eller hushållens komfort inte påverkas och att regleringen inte är märkbar för elanvändaren. Exempelvis ska temperaturen i ett kylskåp hållas inom ett visst spann för att inte riskera att kvaliteten på maten blir sämre. Vid implementering av DSR SFC skulle lösningen utformas så att kylskåpens inbyggda gränsvärden alltid befinner sig inom kylskåpets maximum- och minimumtemperatur.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> För en närmare beskrivning av hur kylskåp fungerar, se teoriavsnitt 3.1

Med DSR SFC skulle kylskåpens önskade temperatur kunna flyttas proportionerligt mot en frekvensavvikelse inom ett visst frekvensintervall som definieras av relevant systemoperatör. Chippet tillåter att elförbrukning förflyttas framåt i tid för att jämna ut obalanser i elnätet. En enskild enhet har i sig ingen signifikant påverkan på frekvensen eftersom effektuttaget är relativt litet. Däremot förväntas ett stort antal aggregerade enheter ha en tillräckligt stor effekt som till fördel kan fungera som en primärreserv och därmed bidra till att upprätthålla driftsäkerheten i elsystemet (ENTSO-E, 2012b). Detta alternativ förväntas ge det mest optimala utfallet ur ett socioekonomiskt perspektiv eftersom kraftsystemet får en ökad driftsäkerhet. Dock negligeras både marknaden och kundens roll i denna mekanism. I nätkoden presenteras några möjliga tjänster av förbrukningsflexibilitet som antingen kan vara obligatoriska eller frivilliga, t.ex. hantering av överföringsbegränsningar, kontroll över aktiv eller reaktiv effekt och snabb styrning av aktiv effekt (ENTSO-E, 2012c). Styrning av apparater kan även användas för att reglera större frekvensstörningar i kraftsystemet som inträffar mindre än en gång per år (ENTSO-E, 2012a).

De funktionella och tekniska kraven i DSR SFC har tidigare föreslagits vara obligatoriska och tillämpbara på alla nya temperaturkontrollerade hushållsapparater. ENTSO-E (European Network of Transmission System Operator for Electricity) som utarbetar nätkoderna har tagit fram tre studier som samtliga visar att DSR SFC är effektivt. Studierna utfördes på Irland, i kontinentaleuropa och Sverige. Kapitalkostnaden för de frekvensstyrda chippen kommer till större del utgöras av kostnader för forskning- och utveckling. Den irländska studien beräknar att varje chip skulle komma att kosta mellan 2-5 euro. Den slutliga kostnaden för DSR SFC kan komma att fördelas över samtliga elanvändare genom en ökad årlig nätavgift. Implementering av denna lösning förväntas ta lång tid eftersom dessa chip endast installeras i nya apparater och omställningsperioden uppskattas till 15 år (ENTSO-E, 2012b).

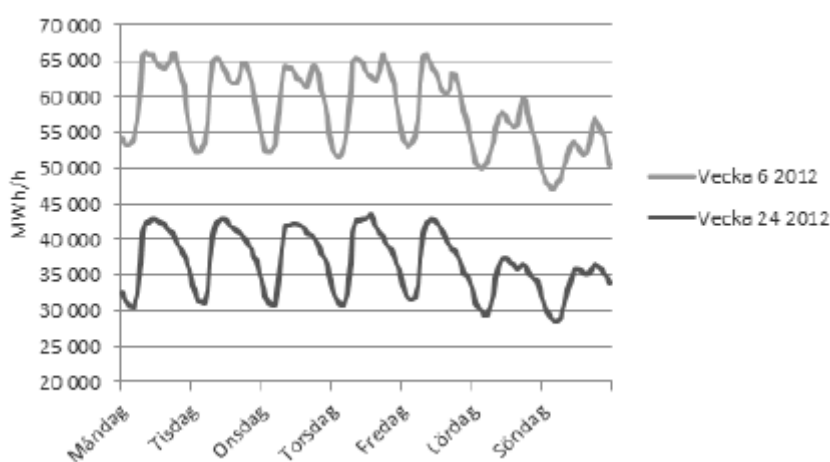
Kritik har framförts mot förslaget om obligatoriska chip eftersom vissa anser att elanvändarnas intressen inte är tillräckligt skyddade (ENTSO-E, 2012b). Energimarknadsinspektionen (Ei) har tidigare framfört att DSR bör implementeras med marknadskrafter och inte i nätkoden. Ei har också uttryckt oro över att tekniken ännu är oprövad och bör utredas ytterligare innan nätkoden lagstiftas. Vidare menar Ei att tekniska krav på DSR i koden förhindrar ny teknik och tjänster från att inta marknaden och att aktörer så som aggregatorer, som säljer aggregerad förbrukningsflexibilitet, bör få tillgång till marknaden (Energimarknadsinspektionen, 2013). Även Svensk Energi har påpekat att kraven som ställs på elmarknadens aktörer bör vara funktionella och inte tekniska för att förhindra onödiga regleringar och investeringar (Svensk Energi, 2015). Andra intressenter menar att obligatoriska chip kan påverka reglermarknaden och aktörer såsom generatorägare (ENTSO-E, 2012a). Svenska kraftnät har uttryckt sitt stöd till DCC och möjligheten att autonomt reglera systemfrekvensen med hjälp av förbrukning. Svenska kraftnät menar att vid frekvensreglering genom flexibel

förbrukning behöver laststyrningen vara obligatorisk för att den ska vara effektiv och förutsägbar (Svenska kraftnät, 2013d).

Sedan mars 2015 är DCC-koden i beslutsfasen. I denna process ska EU-kommissionen ta beslut om nätkoden. Sedan måste respektive medlemsstat ta fram avvikelser och tillägg för koderna som ska gälla på nationell nivå (ENTSO-E, 2012a). Kommissionen har inför beslutsfasen tagit bort det obligatoriska kravet på automatisk frekvensstyrning av hushållsapparater ur DCC-koden (Danell, 2015). Enligt Johan Lundqvist, regionchef på Svensk Energi och delaktig i utvecklandet av nätkoderna, är anledningen att kravet skulle ha stängt ute marknaden och kunden från möjligheten att köpa och sälja tjänster (Lundqvist, 2015).

### 2.3.2 Förbrukningsflexibilitetens potential

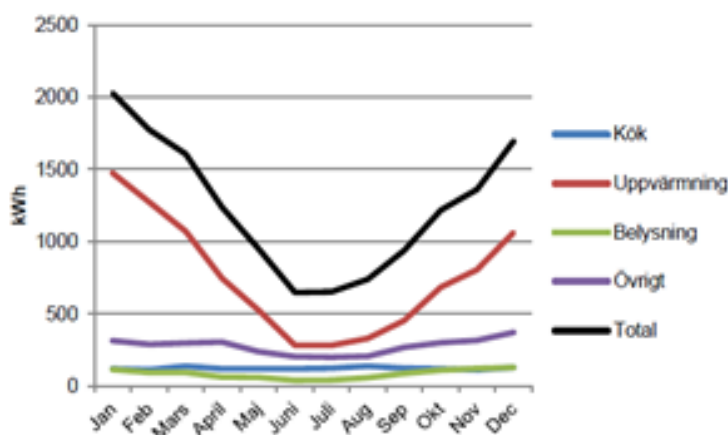
Den totala elförbrukningen år 2013 var 139,5 TWh och den högsta medelförbrukningen under vintern 2013/2014 uppgick till 24 760 MWh/h (Svenska kraftnät, 2014). Elanvändning varierar både över året och dygnet och påverkas av levnadsvanor samt externa omständigheter, t.ex. väder. Figur 5 visar hur den totala elanvändningen i Norden varierade under två veckor 2012. Konsumtionsmönstret i Sverige följer den nordiska lastkurvan där två tydliga konsumtionstoppar kan urskiljas under ett dygn. Detta syns dock inte lika tydligt under sommaren. Timmarna med störst förbrukning benämns *höglasttimmar* medan timmarna med lägst förbrukning benämns *låglasttimmar*. Inom dygnet följer de privata hushållens elanvändning den totala förbrukningskurvan (Broberg, et al., 2014). Att elförbrukningen i hemmen följer våra levnadsvanor kan till viss del ses som potentiell restriktion för laststyrning. Enligt Energimarknadsinspektionens studie "En elmarknad i förändring" (2014) väntas kunderna kräva en högre ersättning än vad som idag är möjligt att spara genom att omfördela elanvändningen. Det finns dock möjligheter att omfördela elanvändningen på längre sikt med hjälp av smart hemutrustning som kan flytta last samt om elanvändarna förändrar sina levnadsvanor (Broberg, et al., 2014).



Figur 5. Förbrukningen i Norden under vecka 6 och vecka 24 2012 (Svenska kraftnät, 2013b)

En mer dynamisk förbrukning kräver en förståelse av hur och var konsumenter använder el. Kartläggning av konsumtionsmönster kan användas för att redogöra var potentialen finns för kostnadsbesparingar i hushåll samt hur förbrukningen kan förflyttas över dygnet (Broberg, et al., 2014). Ett projekt kallat Smart-A som stöttats av EU-kommissionen visar att hushållsapparater har stor potential för laststyrning. De hushållsapparater som undersökts är: tvättmaskiner, torktumlare, diskmaskin, spisar, kylskåp och frysar, luftkonditionering, varmvattenberedare, elvärme och värmepump. Till år 2025 förväntas hushållsapparater ha blivit mer energieffektiva med en 20 % lägre energiförbrukning (Stamminger, 2008). I tidigare studier publicerade mellan 2006-2013 har den sammanlagda uppskattade volymen förbrukningsflexibilitet från industrier och hushåll i Sverige varierat mellan ungefär 1300 - 2600 MW. Av detta uppskattas 500 - 1000 MW utgöras av industrilast. Den framtida potentialen för total mängd förbrukningsflexibilitet i Sverige uppskattats öka till mellan 3000 - ca 4400 MW (Mökander, 2014). Elforsk bedömer att potentialen i industrin uppgår till 2000 MW men att hushållens potential endast är 500-1500 MW (Elforsk, 2014). Under ansträngda lägen kan det räcka med att flytta några 100 MW för att undvika effektoppar, eller för att nya toppar ska skapas. Enligt en studie av Elforsk skulle reglerkapaciteten bli ca 300 MW om landets samtliga kylar och frysar skulle förses med frekvensreglering, vilket är mer än den svenska frekvensstyrda normaldriftsreserven FCR-N (Elforsk, 2013) men mindre än den svenska störningsreserven FCR-D (Bäck, 2015).

Säsongvariationerna i elanvändning för privata hushåll illustreras i Figur 6 som beskriver konsumtionsmönstret per månad för medianvillan, fördelat över specifika ändamål. Ur figuren framgår att elförbrukningen är högre under vinterhalvåret än under sommaren till följd av kallare klimat. Figuren visar även att uppvärmning utgör en betydande del av den totala elanvändningen för hushåll (Broberg, et al., 2014).



Figur 6 Elförbrukning per månad för medianvillan (Broberg, et al., 2014)

Figur 6 visar även att elanvändningen för kök utgör en relativt liten del av hushållens totala elanvändning. För mer än 20 år sedan stod kylar och frysar för nästan en tredjedel

av elförbrukningen i svenska hem (Energimyndigheten, 2009a). I takt med förändrade levnadsvanor, energieffektiva och miljövänliga tekniker samt direktiv från EU har denna andel minskat till drygt en femtedel av hushållselen. Trots detta är potentialen för förbrukningsflexibilitet stor för kylskåp och frysar eftersom dessa apparater alltid är anslutna till elnätet och konsumerar el varje dag under hela året (Marcus-Möller, 2006). Kyl- och frysskåpens förbrukning varierar mycket lite över årstider och över dygnet vilket gör att flexibiliteten är förutsägbar och pålitlig. Det krävs dock ett stort antal enheter för att kunna reglera obalanser i nätet (Nyeng, et al., 2010; Marcus-Möller, 2006). År 2014 fanns det totalt 4 669 081 hushåll i Sverige (Statistiska Centralbyrån, 2015b). Förutsatt att samtliga hushåll innehar ett kylskåp i hemmet, innebär det att det finns lika många kylskåp i Sverige.

### **2.3.3 Pilotprojekt och tidigare studier**

Tidigare studier har undersökt möjligheter att använda hushållsapparater för laststyrning och resultaten från dessa presenteras i följande avsnitt. Stadler et al (2007) studerar två strategier för att styra hushållsapparaters elförbrukning och flytta laster över dygnet. I det första scenariot styrs kylskåpen direkt (i realtid) genom att slumpmässiga styrsignaler, som är integrerade i kylskåpen, bestämmer om enheten ska kopplas bort eller återanslutas. Styrningen ska ske sekventiellt för att undvika att för många kylskåp kopplas bort eller återansluts. Direktstyrningen indikerade på att för ett stort antal enheter så lämpar sig flexibiliteten till att balansera nätet under en kort tid. I det andra scenariot är styrningen av kylskåpen tidsinställd, vilket innebär att kylskåpen stängs av vid en given tidpunkt utifrån en given sannolikhet. Studien visade att om temperaturen tillåts variera mellan 3 °C och 8 °C, istället för mellan 5 °C och 8 °C, så ökar potentialen att flytta last (Stadler, et al., 2007).

På Bornholm har flertalet pilotprojekt genomförts där frekvensstyrning av kylskåp studerats. Xu et al. (2008) modellerar hushållsapparater med värmeenergi och dess påverkan på kraftsystemet och presenterar två typer av styrning. Den ena typen är att apparaterna slumpmässigt stängs av när frekvensen understiger 49,9 Hz. Den slumpmässiga faktorn medför att varje kompressor endast kopplas bort 1-2 gånger per månad. Denna typ av styrning kan användas som störningsreserv eftersom de kan aktiveras inom sekunder (Xu, et al., 2008). Den andra typen av styrning är att flytta på apparatens max- och mingränser i förhållande till storleken på frekvensavvikelsen. Eftersom det går att styra hur stor andel av reserven som aktiveras med hjälp av en proportionalitetskonstant, lämpar sig denna typ av styrning som normaldriftsreglering. Xu et al. (2008) menar att kylskåpen kan vara bortkopplade i 15 minuter utan att temperaturen förändras drastiskt. Trots detta anses det enligt studien inte lönsamt att investera i frekvensreglerande styrenheter i de minsta och mest energieffektiva kylskåpen idag, enligt Xu et al. (2008).

Även Nyeng et al. (2010) har visat att kylskåp kan fungera som normaldriftsreserv med ett närmast linjärt förhållande mellan frekvensavvikelse och effektförbrukning. När ett stegsvar testas visar dock resultatet på en olinjär respons. Stegsvaret kan liknas vid en

störning vilket illustrerar att det kan uppstå problem då kylskåpen bidrar med störningsreglering (Nyeng, et al., 2010). Vid enkel decentraliserad styrning där referenstemperaturen flyttas linjärt så riskerar enheterna att hamna i fas med varandra. Detta kan leda till ett stort effektbehov när många kylskåp behöver återanslutas, vilket i sin tur kan medföra en oscillerande frekvens (Angeli & Kountouriotis, 2012; Marcus-Möller, 2006). Nyeng et al. (2010) menar att detta kan hanteras med hjälp av avancerad styrning. Användningen av smarta apparater måste utformas så att det inte uppstår nya förbrukningstoppar till följd av lastförflyttningen. För att undvika detta kan lasten kopplas in stegvis (Stamminger, 2008). Fenomenet med *den återvändande lasten* kan exempelvis undvikas genom att en slumpfaktor införs vid styrningen. Det kan ske genom centraliserad styrning där nätoperatören skickar styrsignaler (Angeli & Kountouriotis, 2012). Hushållsapparater som är uppkopplade är dock dyra och för att förbrukningsflexibiliteten ska bli utbredd behöver styrningen göras enkel (Frey, 2009). Effekttoppar orsakade av den återvändande lasten kan också undvikas med hjälp av decentraliserad styrning där enheterna slumpmässigt "hoppa" mellan tillstånden på och av. Genom att enheterna som bidrar med flexibilitet är utspridda över temperaturintervallet, istället för att de kallaste enheterna stängs av först, kan oönskade överslängar undvikas, enligt Angeli & Kountouriotis (2012). Marcus-Möller (2006) menar likt Angeli & Kountouriotis (2012) att problematiken med den återvändande lasten kan hanteras genom att den frekvensstyrda utrustningen innehåller en slumpmässig faktor som gör att en bortkopplad apparat återansluts efter en slumpmässig tidsfördröjning vid normalfrekvens (Marcus-Möller, 2006). Kompressorn i kylskåpet kan slås av omedelbart men inte sättas på direkt igen utan att skada utrustningen och förkorta kompressorns livslängd. För att undvika detta kan tidsfördröjningen 5-10 minuter användas som minimumvärde (Marcus-Möller, 2006). Tidsfördröjningen bör varieras för olika enheter för att förhindra att för många enheter slås på samtidigt (Xu, et al., 2008)

Det är inte bara smart återkoppling som är nödvändig vid laststyrning, det är också viktigt att apparaterna kopplas bort på ett smart sätt. Vid storskalig implementering av frekvensreglerande förbrukningsflexibilitet finns annars risken att en för stor mängd kopplas bort samtidigt, vilket inte är önskvärt ur systemoperatörens perspektiv. En jämförelse kan göras med solceller i Tyskland, där en betydande mängd produktion är konstruerad att slå av om frekvensen överstiger 50,2 Hz (Douglass, et al., 2013). För att undvika stora stegvisa förändringar av lasten menar Douglas et al (2013) att ett tröskelvärde för frekvensregleringen inte bör användas. Xu et al. (2011) menar dock att det går att förhindra överaktivering och göra bortkopplingen proportionell mot störningen genom att sätta slumpmässiga set-points för en stor mängd apparater vid störningsreglering, exempelvis inom intervallet 49,9-49,5 Hz (Xu, et al., 2011).

## 3. Teori

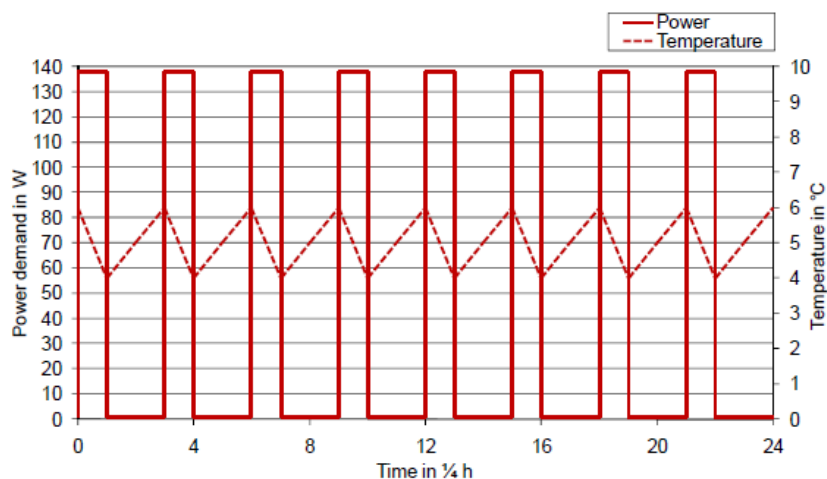
Detta avsnitt beskriver hur kylskåp fungerar. Ekvationer för värmeöverföring och samband för hur nätfrekvensen varierar presenteras också.

### 3.1 Kylskåp

En av hemmets vanligaste och mest använda hushållsapparater är kylskåpet. Grundprincipen är att kyla livsmedel som förvaras i kylskåpet genom att transportera värme inne i kylskåpet ut till omgivningen. Ett kylskåp är ofta utrustat med en förångare, kompressor, kondensor och en expansionsventil som är sammanbundna i ett slutet system. I detta system cirkulerar ett köldmedel, som växlar mellan att vara i gasform och i vätskeform (Marcus-Möller, 2006).

De flesta kylskåp är idag utrustade med en kompressor med fast varvtal (Ekblad, 2015). En termostat inuti kylskåpet driver kompressorn och kylskåpets cykel (Stamminger, 2008). Termostaten känner av temperaturen i kylskåpet och signalerar när kompressorn ska starta och stoppa för att hålla den förinställda referenstemperaturen, s.k. börvärde (eng. setpoint). Rekommenderat börvärde är 4-5 °C (Livsmedelsverket, 2011). Termostaten i kylskåpet kontrollerar skillnaden mellan den faktiska temperaturen (ärvärde) och den önskade temperaturen (börvärde). Vid den maximala tillåtna temperaturen (eng. cut-in temperature), startar kompressorn eftersom temperaturen inuti kylskåpet är för hög. På motsvarande sätt finns det en minimum-temperatur (eng. cut-off temperature), då kompressorn stängs av för att temperaturen i kylskåpet är för låg (Ekblad, 2015). Temperaturen i kylskåpet ska alltid hållas inom detta maximum- och minimumvärde för att inte riskera att kvaliteten på maten blir sämre (Modin & Lindblad, 2011). Ur ett matförvaringsperspektiv är det bäst att undvika temperaturfluktuationer eftersom temperaturen har en stor påverkan på vissa livsmedels hållbarhet. Risken för tillväxt av bakterier minskas ju kallare ett livsmedel förvaras (Modin & Lindblad, 2011). Dock är bäst-före-datomet för många produkter deklarerat för 8 °C, vilket är högre än referenstemperaturen i de flesta kylskåp. Därför behöver inte ökade temperaturfluktuationer ha någon faktiskt påverkan på hållbarheten eftersom livsmedlen oftast förbrukas långt innan de blir dåliga (Ekblad, 2015).

Tiden från det att kompressorn är på (även kallad gångtid) och avstängd fram tills den slås på igen kallas för en cykel (Fridenäs, 2015). Ett kylskåp med fast varvtal förbrukar endast el när kompressorn är på (Marcus-Möller, 2006) men allt fler kylskåpsmodeller inkluderar andra elkonsumerande funktioner t.ex. en ismaskin, kolsyremaskin eller självavfrostning (Ekblad, 2015). Figur 7 illustrerar det generella mönstret för hur kylskåpets effektförbrukning ser ut och hur temperaturen varierar i det tillåtna temperaturspannet (Stamminger, 2008).

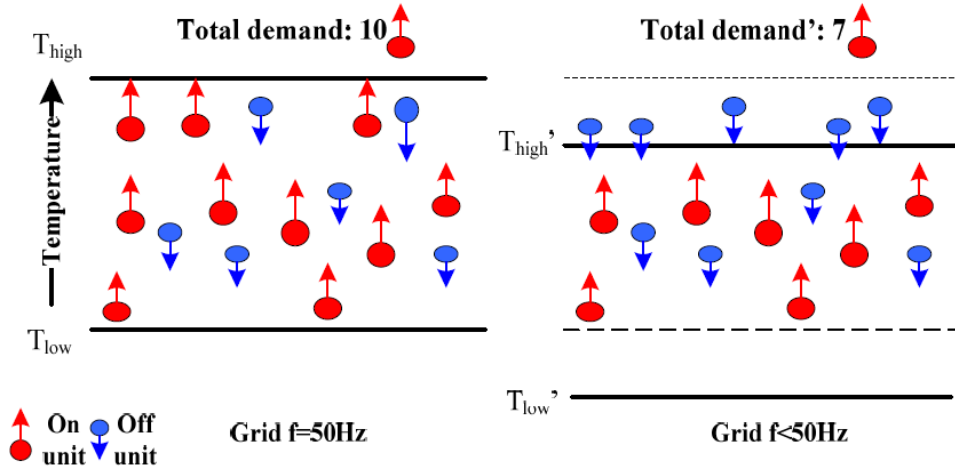


Figur 7 Generellt mönster för kylskåpets effektförbrukning över ett dygn (Stamminger, 2008)

På grund av en hög startström är effekten initialt hög när kompressorn sätts på efter att ha varit avstängd. Detta innebär också att effekten är lite högre initialt när kompressorn sätts på. Effekttoppen varar endast några sekunder men bidrar till en hög verkningsgrad (Ekblad, 2015).

Eftersom kompressorn arbetar mellan två lägen vid normaldrift kan beteendet nyttjas som en reserv (Marcus-Möller, 2006). För att kylskåpen ska kunna regleras utifrån nätfrekvensen måste kylskåpens normala beteende ändras så att enheterna reagerar på avvikelser i nätet (Short, et al., 2007). Styrning av kylskåp omfattar både att öka och minska elförbrukningen. Styrning av kylskåpens effektförbrukning i tiden kan ske genom att ändra det tillåtna temperaturspannet som kompressorn får arbeta mellan. Om frekvensen är under 50 Hz kan kylskåpens referenstemperatur höjas för att låta kompressorerna arbeta kortare än vid normaldrift. Samtidigt innebär detta att några enheter stängs av tidigare än vid normal drift eftersom den undre temperaturgränsen också höjts (Ea Energy Analyses, 2013). Denna förändring illustreras i Figur 8 där några kylskåp tillåts vara på längre eller slås på vid den övre temperaturgränsen och några kylskåp stängs av tidigare vid den undre temperaturgränsen. Detta sker som en följd av att frekvensen understigit 50 Hz.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Mer om detta i kapitel 4.2



Figur 8. Frekvensen sjunker under 50 Hz och medför att temperaturspannet flyttas. Kylskåp som ligger vid den övre temperaturgränsen stängs av tidigare. Kylskåp som ligger vid den undre temperaturgränsen får vara på längre (Xu, et al., 2008).

### 3.1.1 Värmeöverföring kylskåp

Som tidigare nämnts förflyttas värmeenergi inne i kylskåpet ut till omgivningen för att hålla temperaturen kring bör-värdet. Värmeöverföringen sker till följd av att rummet och kylskåpets temperatur är olika. Energin som flödar mellan rummet och kylskåpet,  $dE$  [J], under en tidsperiod,  $dt$  [s], kan skrivas enligt (1):

$$dE = U \cdot a \cdot (T_{kyl} - T_{rum}) \cdot dt \quad (1)$$

där  $U$  [J/m<sup>2</sup>°Cs] är värmeförlusten genom kylskåpets väggar,  $a$  [m<sup>2</sup>] är arean på det läckande området,  $(T_{kyl} - T_{rum})$  [°C] är temperaturskillnaden mellan kylskåpet och rummet (Short, et al., 2007).

Mängden energi vid värmeöverföringen,  $dQ$  [J], kan också beskrivas av (2) (Cheng, et al., 2013)

$$dE = dQ = m \cdot c_p \cdot (T_{kyl} - T_{rum}) \quad (2)$$

där  $mc_p$  [J/°C] är kylskåpets termiska massa. För att beskriva hur temperaturen inuti kylskåpet varierar när kompressorn är av kan (1) och (2) skrivas om till (3). När kompressorn är på utförs ett arbete som påverkar temperaturen i kylskåpet och beskrivs av (4) (Angeli & Kountouriotis, 2012).

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{Ua}{mc_p} (T_{kyl} - T_{rum}) \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{Ua}{mc_p} (T_{kyl} - T_{rum} + \frac{COP \cdot P}{Ua}) \quad (4)$$

Kompressorns effektivitet ges av köldfaktorn  $COP$  (eng. coefficient of performance) och visar utvunnen kylenergi i förhållande till kompressorns effektförbrukning (Marcus-

Möller, 2006). Den förenklade ekvationen beskriver kylskåpets värmeöverföring linjärt men i verkligheten sker uppvärmning och nedkylning exponentiellt. Temperaturförändringen enligt (4) kan skrivas om på tillståndsform enligt

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

där vektorerna  $x$  är systemets tillstånd,  $u$  är insignal och  $y$  är utsignal. Vid omskrivning på tillståndsform fås (6), där utsignalen  $y$  är temperaturen i kylskåpet.

$$\frac{dT}{dt} = A \cdot (T_{kyl} - T_{rum}) + B \cdot P \quad (6)$$

$$dT = C \cdot (T_{kyl} - T_{rum}) + D \cdot P$$

$$\text{där } A = -\frac{Ua}{mc_p}, B = -\frac{COP}{mc_p}, C = 1, D = 0.$$

Rumstemperaturen  $T_{rum}$  sattes som en konstant insignal. Därmed blir insignalen  $u$  en vektor bestående av effekten  $P$  och rumstemperaturen  $T_{rum}$ . Den slutgiltiga tillståndsmodellen ges av (7).

$$\frac{dT_{kyl}}{dt} = A \cdot T_{kyl} - [A \quad -B] \begin{bmatrix} P \\ T_{rum} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Då  $N$  antal kylskåp simuleras fås att  $A$  och  $C$  är  $[N \times N]$ -matriser,  $B$  och  $D$  är  $[N \times 2N]$ -matriser samt att  $T_{kyl}$ ,  $P$  och  $T_{rum}$  är  $[N \times 1]$ -vektorer.

## 3.2 Elnätet

Sambandet för hur nätfrekvensen varierar härstammar från svängningsekvationen (eng. swing equation) och kan förenklas enligt (8) (Bevrani, 2007).

$$\Delta P_g(t) - \Delta P_f(t) = 2H \frac{d\Delta f(t)}{dt} + D\Delta f(t) \quad (8)$$

där  $P_g$  [MW] är den genererade effekten,  $P_f$  [MW] är den förbrukade effekten,  $H$  [Ws] är tröghetskonstanten i systemet,  $f$  [Hz] är nätfrekvensen och  $D$  [MW/Hz] är lastdämpningskoefficienten. Dämpningskoefficienten beskriver hur lasten förändras i förhållande till frekvensavvikelsen. Efter Laplacetransformering av differentialekvationen ovan erhålls följande ekvation (Bevrani, 2007)

$$\Delta P_g(s) - \Delta P_f(s) = 2Hs\Delta f(s) + D\Delta f(s) \quad (9)$$

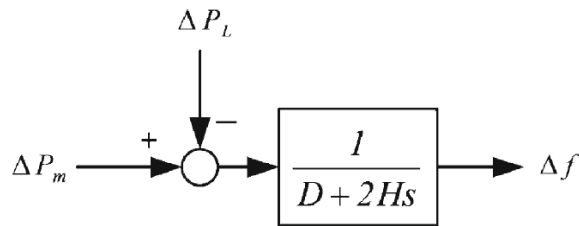
Vidare kan (9) ställas upp enligt (10):

$$\Delta f(s) = \frac{1}{2Hs+D} (\Delta P_g(s) - \Delta P_f(s)) \quad (10)$$

Systemets tröghet ges av  $2H$  och benämns även som  $M$  (Saarinen, 2014). Sambandet i (10) kan ställas upp som ett öppet regelsystem med en insignal  $u(t)$  och utsignal  $y(t)$ . Sambandet mellan in- och utsignal för ett linjärt system kan beskrivas med en överföringsfunktion (Glad & Ljung, 2006) enligt (11).

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (11)$$

Där  $Y(s)$  är frekvensavvikelsen och  $U(s)$  är förändring mellan producerad och förbrukad effekt. Överföringsfunktionen  $G(s)$  ges enligt (10) av  $\frac{1}{Ms+D}$ . Systemet illustreras enligt Figur 9 (Bevrani, 2007).



Figur 9. Blockschemata för elnätet (Bevrani, 2007)

Frekvensen  $f$  kan beräknas utifrån periodtiden  $T$  enligt

$$f = \frac{1}{T} \quad (12)$$

Systemets tröghet beräknades med hjälp av att  $2H$  multiplicerades med (12) för att erhålla rätt enhet på  $M$  [GW/Hz]. Samtliga parametervärden för elnätet sammanställs i Tabell 1.

Tabell 1. Parametervärdena  $D$ ,  $f_0$  och  $H$  är hämtade från (Saarinen, 2014) och värdet för  $M$  är beräknat.

$D$ [GW/Hz]	$f_0$ [Hz]	$H$ [GWs]	$M$ [GW/Hz]
0,36	50	250	10

## 4. Metod

Examensarbetet inleddes med en litteraturstudie som låg till grund för val av syfte, frågeställningar och hur studien skulle avgränsas. Under denna fas utfördes också ett antal intervjuer med respondenter från Svenska kraftnät. Huvuddelen av arbetet bestod därefter i att utveckla en modell för att besvara hur stor kylskåpens potential för laststyrning är, vilka reglerreserver kylskåpen kan bidra med samt hur kraftsystemet påverkas av laststyrning. Därefter utfördes simulering av kontinuerliga obalanser och stegstörningar med olika parametervärden. Data samlades in från externa källor samt erhöles internt från Svenska kraftnät. Som komplement till modellen användes även intervjuer som metod för att besvara syftet och ge en bredare bild av problematiken. Examensarbetet innefattar således både kvantitativ och kvalitativ metod.

### 4.1 Modellering

Under de inledande intervjuerna med medarbetare på Svenska kraftnät framkom två lämpliga program för simuleringarna, Matlab och Svenska kraftnäts interna program Aristo. Efter ett samtal med Linda Ooppelstrup, som arbetar med Aristo på Svenska kraftnät, listades för- och nackdelar med programmen, se Tabell 2.

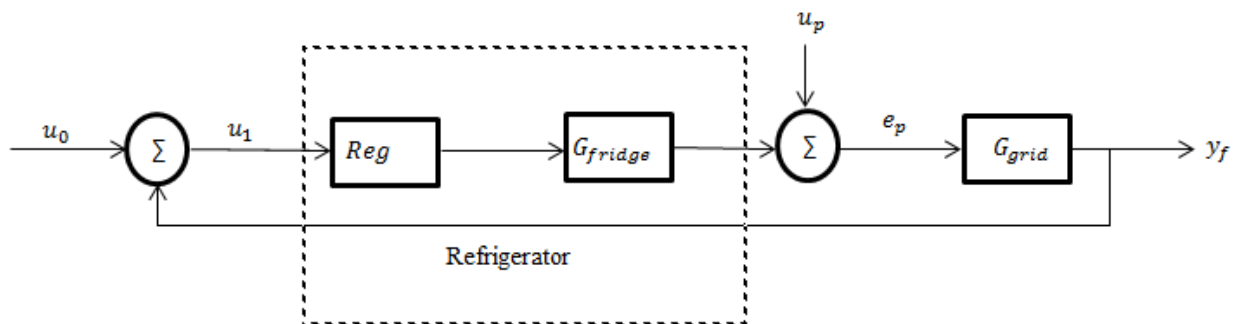
*Tabell 2. Jämförelse mellan två simuleringsprogram*

MATLAB	ARISTO
+ Kan ha frekvens som insignal	- Kan inte ha frekvens som ren insignal
+ Kortare simuleringstid	- Längre simuleringstid
+ Enkelt att se vilka faktorer som påverkar resultatet	- Svårt att veta vilka faktorer som påverkar resultatet
+ Kan utforma en enkel modell för studiens syfte	- Komplicerad modell, måste modellera allt i systemet
+ Kan modellera hela systemet	+ Finns både färdig modell för hela kraftsystemet och reducerade modeller där det är lättare att se vad olika effekter får för generell påverkan
- Måste utveckla en egen modell	- Finns begränsningar eftersom man måste hålla sig till de fördefinierade modellerna
- Fel kan byggas in i modellen	+ Lättare att undvika fel i modellen

Eftersom frekvensen används som en styrparameter för att reglera den fysiska balansen i kraftsystemet ansågs det viktigt att ha frekvensen som insignal. Att kunna urskilja vilka faktorer som påverkar simuleringarna ansågs också viktigt, därför utfördes modelleringen med hjälp av Simulink i Matlab. En kort tidshorisont på 1-2 timmar användes för att undersöka hur förbrukningen påverkar frekvensvariationer i kraftsystemet. Vid simuleringen varierades ett antal parametrar, bl.a. effektobalanser samt kylskåpens tillgänglighet vid olika tid på dygnet. Modellen utvecklades stegvis för ett kylskåp, flera enheter och olika initialtillstånd (en hög- och en låglasttimme).

För att bedöma vilka reglerprodukter som kan erbjudas undersöktes flera faktorer, bl.a. hur stor effekt som kan styras, hur snabbt kylskåpen kan styras samt hur länge de kan bidra med reglerkraft. För att utvärdera resultaten utfördes en känslighetsanalys där parametervärden varierades, bl.a. temperaturspannet, anslutningseffekten och proportionalitetskonstanten som avgör hur många kylskåp som behöver styras vid frekvensavvikelse.

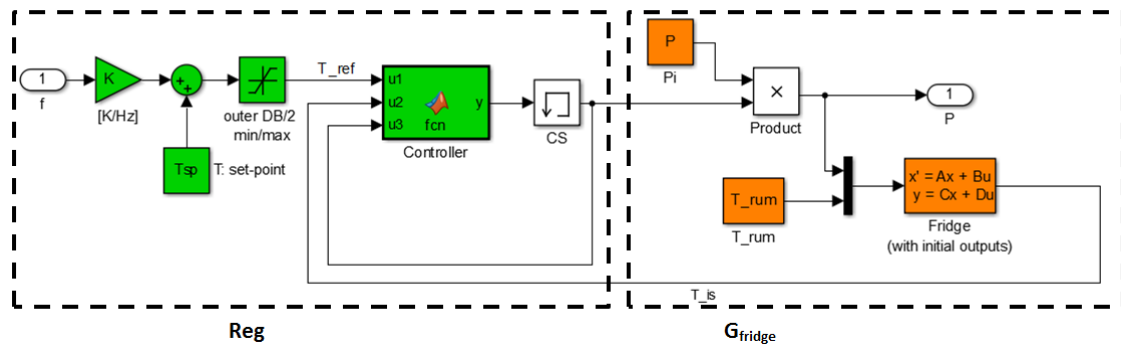
Modellen utvecklades i samråd med Andreas Westberg på avdelningen för kraftsystemanalyser på Svenska kraftnät och Linn Saarinen, doktorand på avdelningen för elektricitetslära på Uppsala universitet. Inledningsvis skapades ett blockdiagram för hela systemet (Se Figur 10). Baserat på antaganden för styrningen togs en regulator fram med nätfrekvens och kylskåpets tillstånd som inparametrar. Kompressorns tillstånd återkopplas från regulatorn och temperaturen återkopplas från kylskåpets överföringsfunktion,  $G_{fridge}$ . Överföringsfunktionen för kylskåpet togs fram utifrån den tillståndsmodell som i avsnitt 3.1.1 härleddes från kylskåpets fysikaliska egenskaper. Utsignalen från  $G_{fridge}$  är kylskåpets effekt, vilken användes som insignal till  $G_{grid}$  för att modellera hur frekvensen varierar i systemet. Frekvensen återkopplades sedan som insignal till regulatorn.



Figur 10. Blockdiagram för systemet

- $u_0$  = initial frekvensavvikelse
- $u_1$  = frekvensavvikelse
- $u_p$  = störsignal
- $e_p$  = obalansen
- $y_f$  = frekvensavvikelse
- $Reg$  = Regulator
- $G_{fridge}$  = Överföringsfunktion kylskåp
- $G_{grid}$  = Överföringsfunktion elnät

Figur 11 visar det delsystem som motsvarar "Refrigerator" i blockschemat för hela systemet i Figur 10.



Figur 11. Modell för kylskåpets styrning och temperaturförändring

#### 4.1.1 Regulatorn

Styrningen utformades huvudsakligen utifrån antaganden om hur DSR SFC var tänkt att utformas i DCC-koden och tidigare studier. Kylskåpet styrs automatiskt med hjälp av chip som känner av frekvensen i elnätet. Antaganden gällande kylskåpen baseras på en intervju samt mailkorrespondens med Mats Ekblad och Daniel Fridenäs på Electrolux.

Med hjälp av referenstemperaturen ( $T_{ref}$ ) bestäms de övre och undre temperaturgränserna för vilka kylskåp som ska styras eller ha en oförändrad status. Vid frekvensavvikelse i elnätet,  $\Delta f$ , flyttas referenstemperaturen med hjälp av en proportionalitetskonstant  $K$  enligt (13).

$$T_{ref}(t) = T_{ref}(t - \Delta t) - K \cdot \Delta f \quad (13)$$

För varje tidssteg  $\Delta t$  beräknas referenstemperaturen utifrån värdet från föregående tidssteg,  $T_{ref}(t - \Delta t)$ . Proportionalitetskonstanten  $K$  valdes till 10, eftersom det enligt (13) medför att referenstemperaturen ändras 1 °C vid en frekvensavvikelse på 0,1 Hz (Xu, et al., 2008). Detta för att uppnå maximal reglerstyrka för störningar som är större än de som hanteras av normaldriftsregleringen. Electrolux använder en referenstemperatur på 5 °C vid energideklarering (Fridenäs, 2015). Det initiala värdet på referenstemperaturen  $T_{ref}$  sattes därför till 5 °C i modellen.

Vid beräkningar använder Electrolux en temperatursvängning på 4 °C, vilket innebär att kylskåpets temperatur varierar mellan 3 och 7 °C (Fridenäs, 2015). Minimum- och maximumtemperaturen sätts därför till 3 och 7 °C. I denna studie tillåts referenstemperaturen styras +/-1 °C, vilket innebär att referenstemperaturen varierar mellan 4 och 6 °C. För att är-värdet i kylskåpet inte ska överstiga max- eller mintemperaturen används en temperatursvängning på 2 °C. Kylskåpen styrs enligt (14) och (15) där kravet  $4\text{ °C} < T_{ref} < 6\text{ °C}$  och  $3\text{ °C} < T_{är} < 7\text{ °C}$  måste uppfyllas.

$$T_{är} > T_{ref} + 1\text{ °C} \quad \text{slå på} \quad (14)$$

$$T_{är} < T_{ref} - 1\text{ °C} \quad \text{stäng av} \quad (15)$$

Styrningen utförs i en Matlab-funktion med en for-loop som undersöker den faktiska temperaturen ( $T_{\text{är}}$ ) och kompressorns status (CS) för varje simulerat kylskåp (N). Om kylskåpet har en högre temperatur än det maximalt tillåtna ( $T_{\text{ref}} + 1 \text{ °C}$ ), sätts kompressorn på (ON) och på motsvarande sätt stängs kompressorn av (OFF) om kylskåpets temperatur är lägre än det undre gränsvärdet ( $T_{\text{ref}} - 1 \text{ °C}$ ). Uppfylls ingen av dessa kriterier är kompressorns status oförändrad.

#### 4.1.2 Kylskåpen

Tillståndsmodellen som beskrevs i avsnitt 3.1.1 skrevs in i blocket State-space i Simulink. Effekten samt omgivningstemperaturen användes som inparametrar för att beräkna kylskåpets temperatur.

Storleken på kylskåp varierar efter hur stora hushållen är (Marcus-Möller, 2006). Genomsnittligt antal personer i svenska hushåll är 1,97 (Statistiska Centralbyrån, 2015a) och den vanligaste produkten i Sverige är en kombinerad kyl- och frys. Den näst vanligaste produkten i svenska hushåll är en separat kyl och frys (Ekblad, 2015). För att uppskatta hur många kylskåp som är av kombinerad respektive stor modell gjordes antagandet att alla småhus har separat kylskåp och frys samt att alla lägenheter har kombinerad kyl och frys. År 2014 fanns det enligt Statistiska centralbyrån 2 007 664 småhus respektive 2 661 417 lägenheter. Till lägenheter räknas flerbostadshus, övriga hus och specialbostäder (Statistiska Centralbyrån, 2015b). Endast kylskåp samt kyl-delen i en kombinerad kyl- och frys innefattas i detta arbete. För att göra beräkningar på en kombinerad kyl är det rimligt att anta att ett större separat kylskåp motsvarar två stycken kombinerade kylskåp (Fridenäs, 2015). Det totala antalet kylskåp beräknades enligt antagandet ovan genom att addera antalet småhus med halva antalet lägenheter, och uppgick således till 3 338 373 kylskåp. Utifrån ett tidigare förslag i nätkoden DCC om att alla nya hushållsapparater ska innehålla en frekvensreglerande styrenhet antas i denna rapport att samtliga hushåll har frekvensstyrda kylskåp. Eftersom omställningstiden beräknats till ca 15 år innan alla kylskåp har den nya tekniken antas ett framtidsperspektiv. Parametrarna i denna modell är framtagna för ett separat kylskåp och baseras på en Electrolux ERF3100AOX med energiklass A+++ . Ur ett långtidsperspektiv är kylskåp i denna energiklassning rimligt att utgå ifrån (Ekblad, 2015). Årsförbrukningen för detta kylskåp är 71,175 kWh (Fridenäs, 2015).

Effektförbrukningen i ett kylskåp beror på hur stor produkten är. Dagens kompressorer har en effekt på ungefär 80-100 W när de är igång och förbrukar oftast ingen el när de stängs av. Medeleffekten beräknas utifrån hur stor effekt kompressorn drar och under hur lång tid kompressorn är igång. Medeleffekten för det valda kylskåpet är ca 8 W och med en gångtid på ca 20 % så motsvarar detta en anslutningseffekt på ca 39 W. När anslutningseffekten 39 W implementerades i modellen resulterade det i en gångtid på 23 %. Därmed gjordes antagandet att 23 % av det totala antalet kylskåp initialt är på. Köldfaktorn COP beskriver energieffektiviteten för ett kylskåp och är vanligtvis mellan 1 och 5 (Marcus-Möller, 2006). För den valda kylskåpsmodellen är köldfaktorn 3,06

(Fridenäs, 2015), vilket innebär att för varje kWh el som förbrukas av kompressorn levereras 3,06 kWh värmeenergi.

U-värdet för ett kylskåp brukar vanligtvis ligga mellan 0,2-0,6 W/m<sup>2</sup>°C. Ju lägre U-värdet är desto mindre är värmeläckaget genom väggarna. Hos Electrolux används polyuretan-skum som isoleringsmaterial i både kyl och i frys (Ekblad, 2015). Den valda kylskåpsprodukten har ett U<sub>a</sub>-värde på 1,3695 W/°C. Baserat på kylskåpets mått beräknades den läckande arean till ca 5,1262 m<sup>2</sup>. I simuleringen används ett U-värde på 0,2672 W/m<sup>2</sup>°C, vilket baseras på att värmeläckaget är lika stort i alla delar av kylskåpet. Värmeläckaget som uppstår när kompressorn stannar inkluderas i detta värde (Fridenäs, 2015). Omgivningstemperaturen sattes till 25 °C enligt den energistandard som kylskåpen ofta deklarerar efter (Ekblad, 2015). Efter konsultation med Daniel Fridenäs, projektledare för Applied Thermodynamics på Electrolux, justerades värdet på den termiska massan för att stämma bättre överens med kylskåpets verkliga cykel. Ett värde på 16500 J/°C användes för termisk massa, vilket inkluderar luften, de inre väggarna i kylskåpet och livsmedel. Den termiska massan inkluderar inte kylskåpets ytterväggar och isolering (Fridenäs, 2015; Ekblad, 2015).

I denna studie simulerades 1000 st enskilda kylskåp, som sedan skalades upp för att motsvara det totala antalet kylskåp. Även simuleringar med fler än 1000 st genomfördes men gav inga signifikanta skillnader i resultat. Temperaturerna för ett stort antal aggregerade kylskåp kan till en början väntas vara jämnt fördelade över ett visst temperaturspann. Däremot väntas kylskåpen vara i olika skeden i cykeln. För att spegla verkligheten slumpades vilka kylskåp som är på eller av utifrån gångtiden.

De parametervärden som användes i denna rapport sammanfattas i Tabell 3. Parametervärden som använts i tidigare studier jämfördes med de värden som används i denna studie och sammanställs i Appendix A. Jämförelsen visar att denna studie använder mer energieffektiva kylskåp än många tidigare studier.

Tabell 3. Parametervärden i simulering

Parameter	Beskrivning	Parametervärden
Ua	Termisk isolering	1,3695 W/°C
U	U-värde	0,2672 W/m <sup>2</sup> °C
a	Läckande area	5,1262 m <sup>2</sup>
mc	Termisk massa	16500 J/°C
P	Anslutningseffekt	39 W
COP	Köldfaktor	3,06
p	Gångtid	23,0 %
T_rum	Rumstemperatur	25 °C
n_hushall	Antal hushåll	3 338 373 st

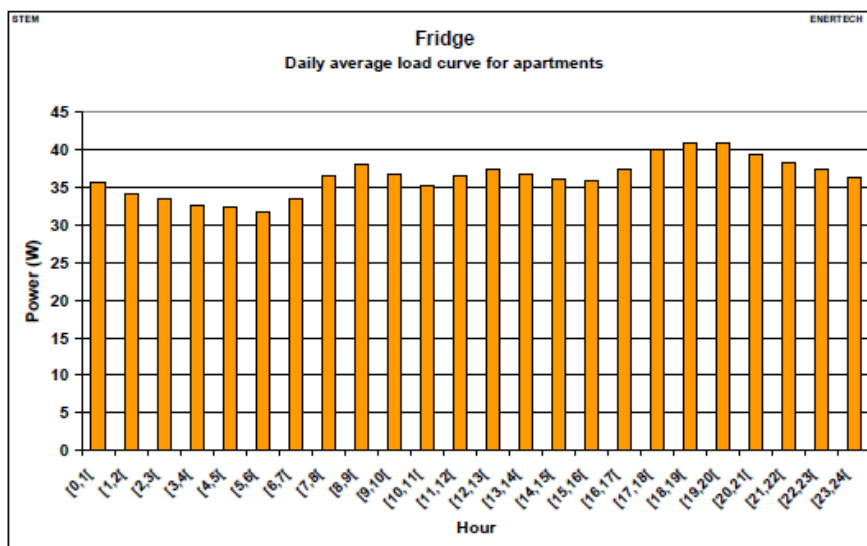
För att kunna diskutera hur fryisar kan bidra till frekvensreglering, även om detta inte simulerades, erhöles även parametervärden för fryisar från Electrolux. En fryis av modell EU29007AOW med energiklass A+++ har en gångtid på 54 % (Fridenäs, 2015).

Som tidigare nämnts är kapacitetskravet för FCR-N i Norden 600 MW. Sverige ska bidra med 230 MW, vilket motsvarar 38,3 % av kapacitetskravet. En tidsserie för skattade obalanser i elnätet under en augustimånad erhöles av Svenska kraftnät (Westberg, 2015). Data för de två första timmarna under ett dygn i augusti valdes. Under den tidsperioden varierade obalanserna mellan ca -340 och 540 MW. Dessa timmar valdes eftersom obalansen inte översteg det nordiska kapacitetskravet för FCR-N under den tiden. Värdena skalades ner till 38,3 % för att motsvara det svenska bidraget till FCR-N och varierar då mellan -130 och 207 MW. Detta för att bestämma hur mycket kylskåpens effekt kan bidra till normaldriftsreglering.

Stegstörningar av olika storlek modellerades också för att se hur störningen och frekvensregleringen från kylskåpen påverkade kraftsystemet vid positiva och negativa obalanser. Genom att simulera stegstörningar kunde den maximala reglerkapaciteten, aktiveringstiden samt uthålligheten undersökas.

I Figur 12 redovisas hur elförbrukningen för kylskåp varierar under dagen. Resultaten baseras på en rapport från Energimyndigheten där hushållsapparater i 400 hushåll studerats (Energimyndigheten, 2009b). De studerade hushållen utgjordes till hälften av småhus och till hälften av lägenheter men i diagrammet visas endast lastkurvan för lägenheter. Även lastkurvan för småhus följer samma mönster men med något mindre variationer. I figuren framgår att den dagliga lastkurvan för aggregerade kylskåp delvis följer kurvan för den totala förbrukningen över ett dygn och att kylbehovet är som störst

vid middagstid mellan klockan 18-20. Förbrukningstopparna kan förklaras av att kylskåpets dörr öppnas oftare vid den tiden på dygnet, för att ställa in och ta ut livsmedel ur kylskåpet (Stamminger, 2008). Då stor termisk massa, dvs. livsmedel som inte är kylda, tillförs kylskåpet uppstår den största belastningen i termer av energiförbrukning (Ekblad, 2015; Fridenäs, 2015).



Figur 12. Kylskåpens konsumtionsmönster under ett dygn i lägenheter (Energimyndigheten, 2009b)

Vid simuleringen beaktades när och hur ofta ett kylskåp öppnas eftersom detta påverkar kylskåpets energiförbrukning över dygnet. Hur stor effekt som potentiellt kan styras vid olika tidpunkter studerades genom att simulera hur tillgängligheten för kylskåp varierar mellan hög- och låglasttimmar. Med hjälp av Figur 12 uppskattades effekten under dygnet i medel samt den lägsta och högsta effektförbrukningen till 36 W, 32 W respektive 41 W för dagens kylskåp. Utifrån dessa värden beräknades den procentuella förändringen av effektförbrukningen vid hög- och låglastimme för att skalas om och motsvara de mer energieffektiva kylskåpen som användes i denna studie. Den totala effekten från de simulerade kylskåpen uppgår till ca 30 MW under medellastimme, enligt antaganden som gjorts i detta examensarbete. Utifrån den totala medeleffekten kunde motsvarande värde för total effektförbrukning under hög- och låglastimme beräknas. De beräknade värdena för total effekt sammanfattas i Tabell 4.

Tabell 4. Beräknade värden för total effektförbrukning vid olika tider på dygnet. Medeleffekten uppskattades från Figur 12 och översattes till total effekt i modellen.

	Medellastimme	Låglastimme	Höglastimme
Medeleffekt	36 W (100 %)	32 W (89 %)	41 W (114 %)
Total effekt	30 MW (100 %)	27 MW (89 %)	34 MW (114 %)

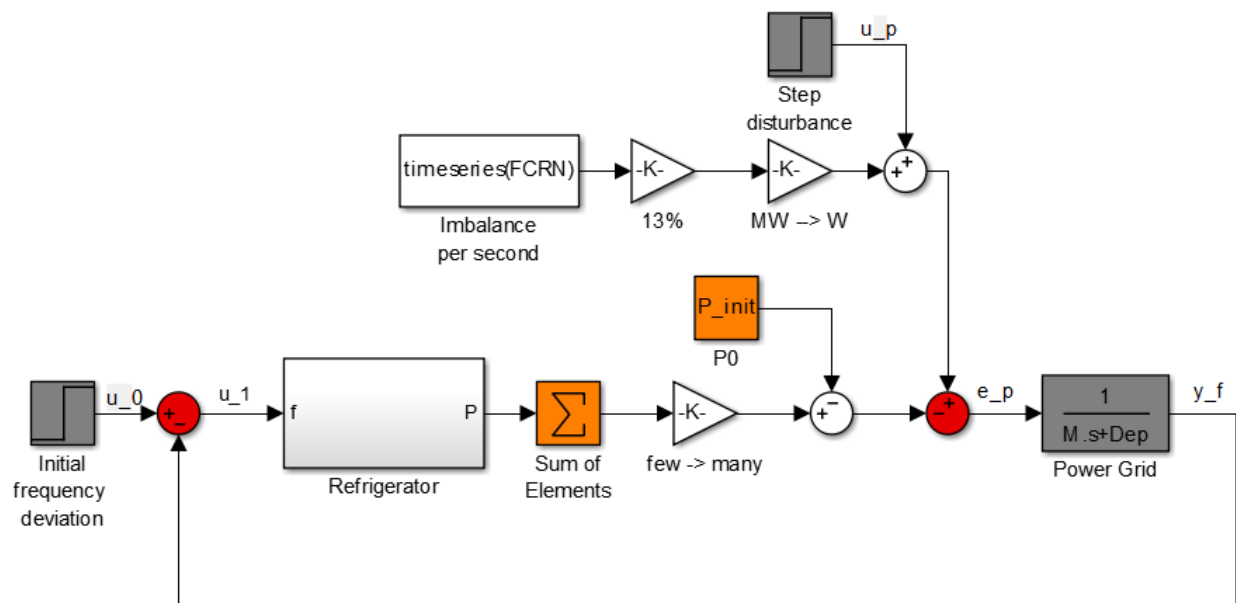
För att uppnå dessa värden på den totala effekten i simuleringarna för hög- och låglasttimme modifierades parametrarna gångtid,  $p$ , och rumstemperatur,  $T_{rum}$ . Utifrån gångtiden vid medellasttimme och den procentuella förändringen i total effekt för hög- och låglasttimme, beräknades gångtiden till 26,2 % respektive 20,5 %. Olika värden på rumstemperaturen simulerades för att ge önskad gångtid och motsvara en förändring i kylskåpets medeltemperatur. De värden på rumstemperaturen som gav önskad gångtid var 27,8 °C för höglast och 22,85 °C för låglast. De simulerade värdena för gångtid och rumstemperatur presenteras i Tabell 5.

Tabell 5. Simulerade värden för gångtid och rumstemperatur som medför beräknad effektförbrukning. Värdena för medellast erhöles från mailkorrespondens med Fridenäs medan värdena för låg- och höglast beräknades.

	Medellasttimme (Fridenäs, 2015)	Låglasttimme (Beräknat)	Höglasttimme (Beräknat)
Gångtid	23,00 %	20,50 %	26,20 %
Rumstemperatur	25,00 °C	22,85 °C	27,80 °C

#### 4.1.3 Elnätet

Kända fysikaliska samband som beskrevs i teoriavsnitt 3.2, användes för att ta fram en överföringsfunktion för elnätet. Figur 13 visar hur systemet representerades i Simulink. Blocket Transfer function i Simulink användes, vilket motsvarar Power grid i Figur 13 och  $G_{grid}$  i Figur 10.



Figur 13. Återkopplad modell för kraftsystemet med automatisk frekvensreglering från kylskåp.

## 4.2 Intervjuer

Intervjuer med respondenter inom elbranschen hölls under examensarbetets genomförande. Dessa personer bedömdes ha god inblick i elmarknaden och kunskaper om laststyrning. Intervjupersonerna valdes huvudsakligen ut på rekommendation av handledaren eller genom att respondenterna i sin tur tipsade om andra intervjupersoner. Nedan följer en tabell över samtliga respondenter, se Tabell 6.

*Tabell 6. Intervjuade personer*

Respondent	Organisation	Datum, plats
Christer Bäck	Svenska kraftnät Drift - Balanstjänst	2015-02-09 - 2015-06-08 Sundbyberg
Jesper Nyberg	Svenska kraftnät Drift - Balanstjänst	2015-02-10, Sundbyberg
Anders Danell	Svenska kraftnät Anläggningar - Nätutveckling	2015-02-12, Sundbyberg
Andreas Westberg	Svenska kraftnät Drift/Kraftsystemanalyser	2015-02-11 - 2015-05-21 Sundbyberg
Linda Ooppelstrup	Svenska kraftnät Drift/ARISTO	2015-02-11, Sundbyberg
Linn Saarinen	Uppsala universitet Elektricitetslära	2015-02-16, Uppsala
Jan Söderberg Karin Hansson	E.ON Dispatch Operation (Power Operation Nordic)	2015-03-30, Telefonintervju
Erik Hjelm	Fortum Power & Heat New Business	2015-04-01, Stockholm
Set Persson	Vattenfall AB Elproduktion	2015-04-08, Sundbyberg
Andreas Wiklander	Jämtkraft	2015-04-14, Telefonintervju
Mats Ekblad Daniel Fridenäs	Electrolux	2015-04-29, Stockholm
Johan Lundqvist	Svensk Energi	2015-05-05, Stockholm
Anders Larsson	Svenska kraftnät	2015-05-18, Sundbyberg

## 5. Simulering av frekvensstyrda kylskåp som reglerprodukt

I detta avsnitt presenteras resultaten från simuleringarna där automatisk frekvensreglering från kylskåp undersökts. Kylskåpens potential för laststyrning och dess påverkan på kraftsystemet beskrivs och slutligen görs en känslighetsanalys av modellen. Resultaten baseras på de antaganden som beskrevs i kapitel 4.2 Modellering.

### 5.1 Kylskåpens potential för laststyrning

För att utreda kylskåpens potential för laststyrning undersöktes kylskåpens reglerkapacitet, aktiveringstid och uthållighet, vilket presenteras nedan.

#### 5.1.1 Reglerkapacitet

Om alla kylskåp som simulerats skulle vara påslagna samtidigt skulle den totala kapaciteten uppgå till 130 MW. När hänsyn tas till hur många kylskåp som initialt är på (23 %) fås att den totala effektförbrukningen är 30 MW. Om de kylskåp som är avstängda (77 %) skulle slås på skulle deras effektförbrukning uppgå till 100 MW. I likhet med resonemanget ovan visade resultatet från simuleringen att reglerkapaciteten är asymmetrisk för upp- och nedreglering. Reglerkapaciteten för upp- och nedreglering kan uttryckas enligt (16) och (17) nedan. Eftersom fler enheter kan slås på än slås av i det intervall som summeringen sker över blir  $\Delta P_+$  större än  $\Delta P_-$ .

$$\Delta P_+ = \sum_{T_{ref}-1^{\circ}\text{C}}^{T_{ref}+1^{\circ}\text{C}-k\Delta f} P(i) \quad (16)$$

$$\Delta P_- = \sum_{T_{ref}-1^{\circ}\text{C}}^{T_{ref}-1^{\circ}\text{C}+k\Delta f} P(i) \quad (17)$$

Den maximala effektförändringen, även kallad effektbidrag, vid en negativ frekvensavvikelse är mellan 0 – 30 MW. Vid en positiv frekvensavvikelse visar simuleringarna att den maximala effektförändringen från kylskåpen är mellan 0 – 66 MW. Det innebär att endast en del av de 77 % som initialt är avstängda kan vara påslagna samtidigt eftersom effektförändringen annars skulle uppgå till 100 MW. Tabell 7 visar en sammanställning av reglerkapaciteten i medel, för hög- och låglasttimme.

Tabell 7. Reglerkapacitet för upp- och nedreglering

	Uppreglering (Total effektförbrukning)	Nedreglering (Total effektförbrukning)
Reglerkapacitet medel MW	30 (0)	66 (96)
Reglerkapacitet höglast MW	34 (0)	66 (100)
Reglerkapacitet låglast MW	27 (0)	66 (93)

Något som kan påverka den framtida reglerkapaciteten vid automatisk styrning av vitvaror är att tekniken utvecklas och att allt fler kompressorer blir varvtalsstyrda, dvs. att kompressorn i stort sett arbetar hela tiden för att kompensera för det normala värmeläcket in i kylskåpet. Kostnaderna för att tillverka denna typ av elektronik minskar och fler tillverkare intar marknaden (Ekblad, 2015). Fridenäs (2015) ser potential i att styra kylskåp med varvtalsstyrda kompressorer eftersom varvtalet kan regleras och ge olika last på elnätet. Dock är kylskåp i Skandinavien energieffektiva och även den minsta kompressorn ger så hög kyleffekt att den ändå kommer att stängas av i perioder. Även självavfrostande produkter blir allt vanligare, vilket kan påverka frekvensstyrning eftersom dessa produkter har en momentan effekthöjning när avfrostningen startar (Ekblad, 2015). Att styra kylskåp efter nätfrekvensen skulle ge en försumbar påverkan på kompressorernas livslängd, både vad gäller kompressorer med fast varvtal och de som är varvtalsstyrda (Ekblad, 2015; Fridenäs, 2015).

### 5.1.2 Aktiveringstid

Små störningar av samma storleksordning som den maximala reglerkapaciteten för uppregering undersöktes. En störning på 100 MW undersöktes eftersom det medför maximal reglerkapacitet för nedreglering och 1000 MW studerades för att motsvara samma storleksordning som det största dimensionerande felet. Störningarna motsvarar differensen mellan producerad och konsumerad el. I Tabell 8 sammanfattas aktiveringstiderna samt det maximala effektbidraget hos kylskåpen vid olika stora positiva och negativa obalanser. Aktiveringstiden varierar med störningens storlek eftersom det finns en tröghet i kylskåpen och att fler kylskåp som befinner sig nära temperaturgränsen aktiveras vid större störningar. Värdena är ungefärliga och varierar något mellan olika simuleringar.

*Tabell 8. Aktiveringstid för kylskåpen vid positiva och negativa obalanser.*

Störning [MW]	Max effektbidrag [MW]	50 % [s]	63 % [s]	100 % [s]
25	16	10	13	47 (0,8 min)
30	20	9	12	54 (0,9 min)
100	66	11	14	180 (3,0 min)
1000	66	2	2	193 (3,2 min)
- 25	- 18	34	62	164 (2,7 min)
- 30	- 20	35	64	197 (3,3 min)
- 100	- 30	13	41	178 (3,0 min)
- 1000	- 30	2	41	179 (3,0 min)

Vid positiva obalanser (<100 MW) uppfyller kylskåpen kravet på aktiveringstid för FCR-N. Mindre negativa obalanser aktiveras inte tillräckligt snabbt men ligger nära kravet för FCR-N, dvs. att reglerprodukten ska vara aktiverad till 63 % inom 60 sekunder och 100 % inom 3 minuter. För störningar av storleksordningen 1000 MW är 50 % av volymen aktiverad inom 5 sekunder vilket uppfyller det ena kravet för FCR-D. Kravet på att 100 % ska vara aktiverat inom 30 sekunder för FCR-D uppfylls däremot inte i något fall. För mindre positiva obalanser aktiveras kylskåpen på mindre än 120 sekunder, vilket uppfyller kravet på aktiveringstid för FRR-A.

### 5.1.3 Uthållighet

I Tabell 9 sammanfattas uthålligheten, det vill säga hur länge kylskåpen bidrar med det effektbidrag som de initialt stabiliserar kring vid positiva och negativa obalanser. Tabellen visar att uthålligheten vid maximalt effektbidrag varierar mellan 2,6–8,3 minuter, därefter minskar effektbidraget successivt. Sett till hur länge kylskåpen bidrar med någon reservkraft (0-100 % av maximalt effektbidrag), är uthålligheten längre, ca 10–26,5 minuter. Vid beräkning av uthålligheten användes det värde som det maximala effektbidraget varierade kring med  $\pm 1$  MW. Värdena är ungefärliga och varierar något mellan olika simuleringar.

*Tabell 9. Kylskåpens uthållighet vid olika positiva och negativa obalanser.*

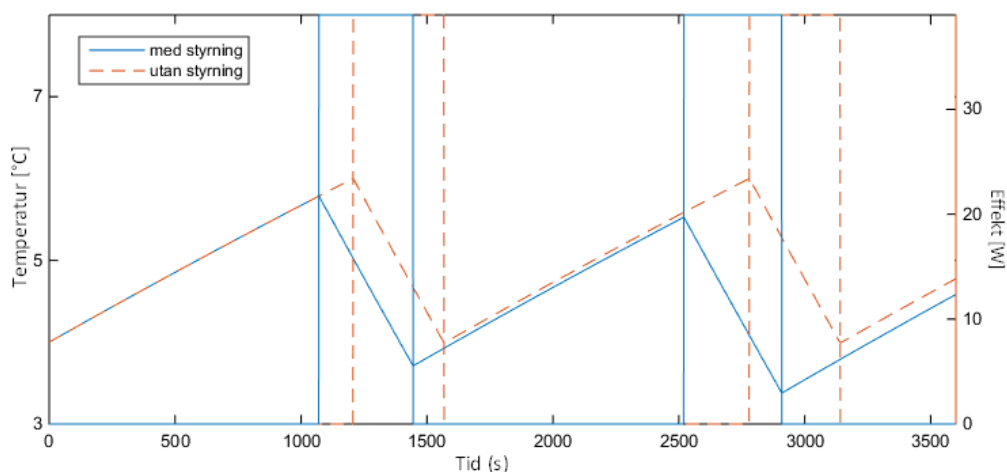
Störning [MW]	Frekvensavvikelse [Hz]	Max effektbidrag [MW]	Uthållighet max effektbidrag $\pm 1$ MW [s]
25	0,024	16	360
30	0,029	20	356
100	0,100	66	231
1000	2,600	66	202
- 25	- 0,025	- 17	177
- 30	- 0,029	- 20	156
- 100	- 0,195	- 30	496
- 1000	- 2,700	- 30	496

## 5.2 Påverkan på kraftsystemet

Nedan beskrivs hur automatisk frekvensreglering från kylskåp påverkar kraftsystemet vid kontinuerliga obalanser och stegstörningar.

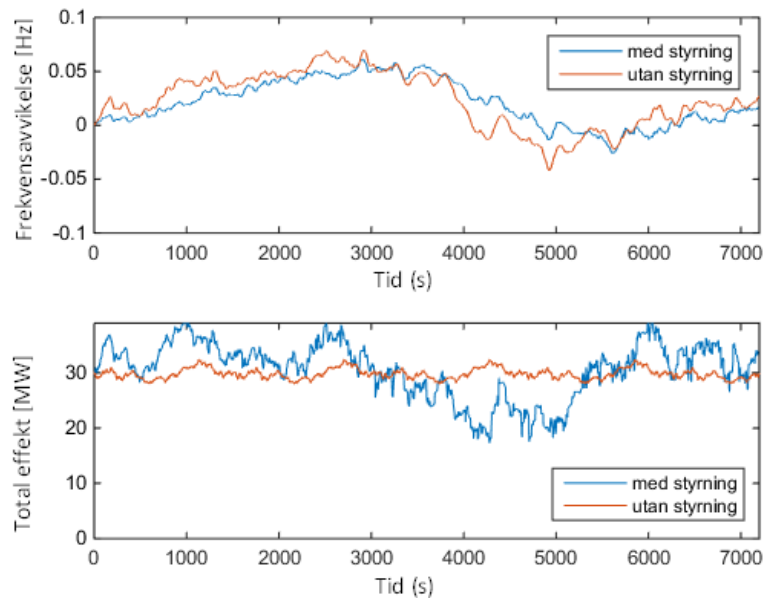
## 5.2.1 Kontinuerlig obalans

Kravet på reglerkapacitet i Sverige är som tidigare nämnts ca 230 MW och den sammanlagda maximala styrbara effekten från kylskåpen är 30 MW för uppreglering. Detta innebär att svenska kylskåp skulle kunna bidra med minst 13 % FCR-N i termer av reglerkapacitet. Data för obalanser skalades ner ytterligare till 13 % och simulerades med och utan styrning av kylskåp. Obalanserna varierade då mellan -13 MW och 20 MW. Figur 14 illustrerar ett kylskåps temperaturvariation samt effektbehov med och utan frekvensreglering under en timme. Då nätfrekvensen överstiger den nominella frekvensen på 50 Hz, flyttas referenstemperaturen ned vilket medför att kylskåpen sätts på tidigare än om kylskåpen inte hade varit frekvensstyrda. Detta innebär att fler kylskåp är på i jämförelse med det initiala tillståndet. Då frekvensen understiger 50 Hz kommer kylskåpen istället sättas på senare i jämförelse med om kylskåpen inte styrts av frekvensen (Se Figur A1 i Appendix B).



*Figur 14. Kylskåpets temperaturvariation med styrning (blå heldragen) och utan styrning (orange streckad). Simuleringen baseras på data för obalanser där kylskåpen reglerar 13 % av obalanserna. Om nätfrekvensen överstiger 50 Hz, stängs kylskåpet av tidigare än om kylskåpet inte är frekvensstyrt.*

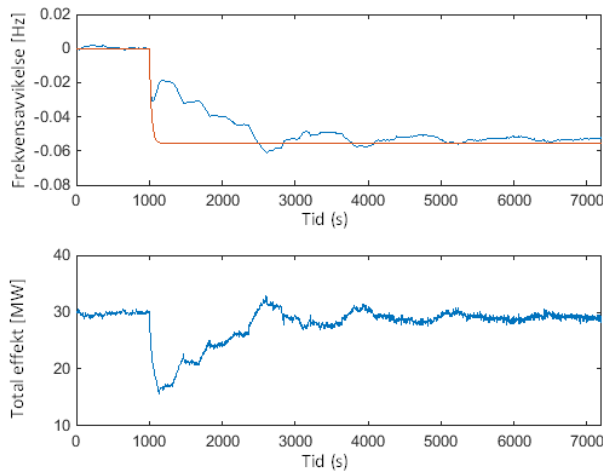
Figur 15 visar kylskåpens totala effekt och påverkan på nätfrekvensen med och utan frekvensreglering. Den övre grafen visar att kylskåpen jämnar ut och dämpar frekvensavvikelse. Samtidigt varierar den totala effekten från kylskåpen mer i jämförelse med utan styrning, vilket illustreras i den nedre grafen i Figur 15. Detta gäller även vid en situation där nätfrekvensen understiger 50 Hz (Se Figur A2 i Appendix B).



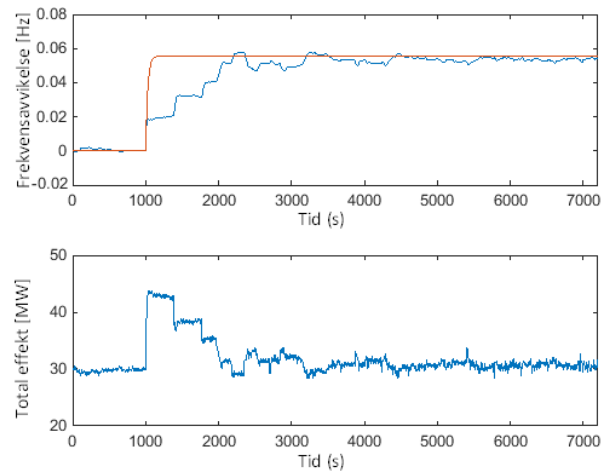
*Figur 15. Hur kylskåpen påverkar nätfrekvensen med styrning (blå) och utan styrning (orange) visas i den övre grafen. Den totala effekten från kylskåpen visas i den nedre grafen. Simuleringen baseras på data för obalanser där kylskåpen reglerar 13 % av obalanserna.*

### 5.2.2 Stegstörning

Figur 16 visar hur en stegstörning på -20 MW påverkar frekvensen när kylskåpen bidrar med automatisk frekvensreglering (blå graf) jämfört med när kylskåpen inte bidrar med reglering (orange graf). Figur 17 visar hur en lika stor men positiv stegstörning påverkar frekvensen.



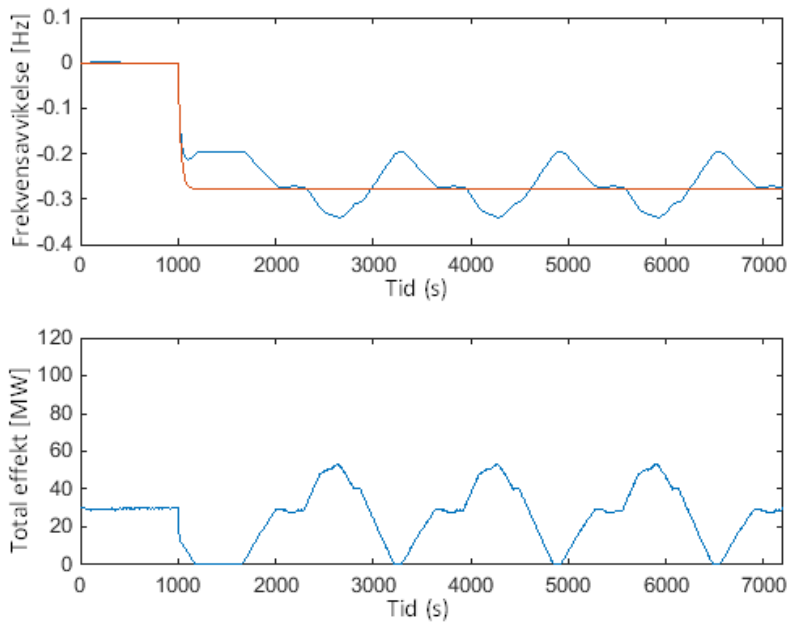
*Figur 16. Steg störning på -20 MW vid  $t=1000$  s. Den övre grafen visar störningens påverkan på frekvensen med kylskåpsreglering (blå) samt utan kylskåpsreglering (orange). Den nedre grafen visar den totala effektförbrukningen från kylskåpen.*



*Figur 17. Steg störning på 20 MW vid  $t=1000$  s. Den övre grafen visar störningens påverkan på frekvensen med kylskåpsreglering (blå) samt utan kylskåpsreglering (orange). Den nedre grafen visar den totala effektförbrukningen från kylskåpen.*

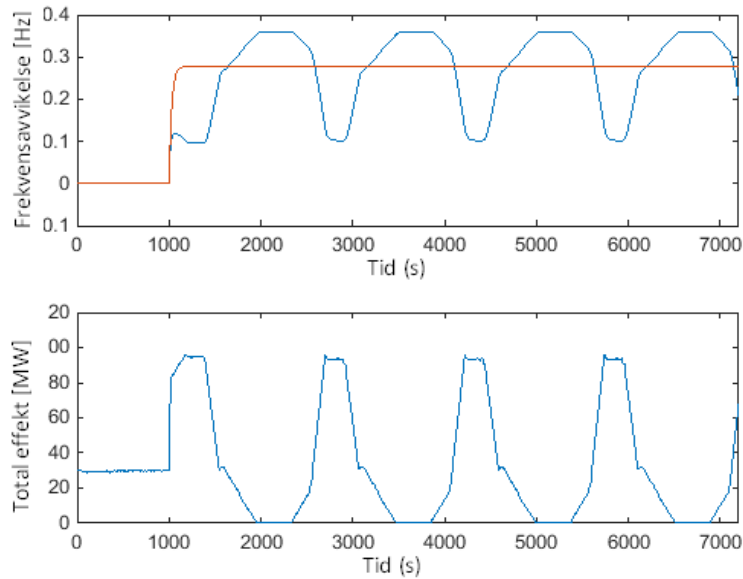
Utän kylskåpsreglering stabiliseras frekvensavvikelsen på -0,06 och 0,06 Hz. Med kylskåpsreglering stabiliseras frekvensavvikelsen initialt istället på -0,02 Hz och 0,02 Hz och går sedan mot samma värde som utan reglering, i takt med att effektbidraget från kylskåpen minskar.

Simuleringarna visar att kylskåpens cykler hamnar i fas för störningar som orsakar en så pass stor frekvensförändring att referenstemperaturen når sitt max- eller minvärde. Detta orsakar en "återvändande last" som i perioder leder till en större frekvensavvikelse jämfört med om automatisk frekvensreglering från kylskåpen inte skulle ha använts. För störningar som medför en frekvensavvikelse som är större än -0,1 Hz flyttas referenstemperaturen till sitt maxvärde vilket innebär att alla enheter stängs av under en viss tid. I Figur 18 illustreras hur detta påverkar frekvensen.



*Figur 18. Steg störning på -100 MW vid  $t=1000$  s. Frekvensgraf: Störningens påverkan på frekvensen med kylskåpsreglering (blå) samt utan kylskåpsreglering (orange). Total effekt-graf: Effektförbrukning från kylskåpen.*

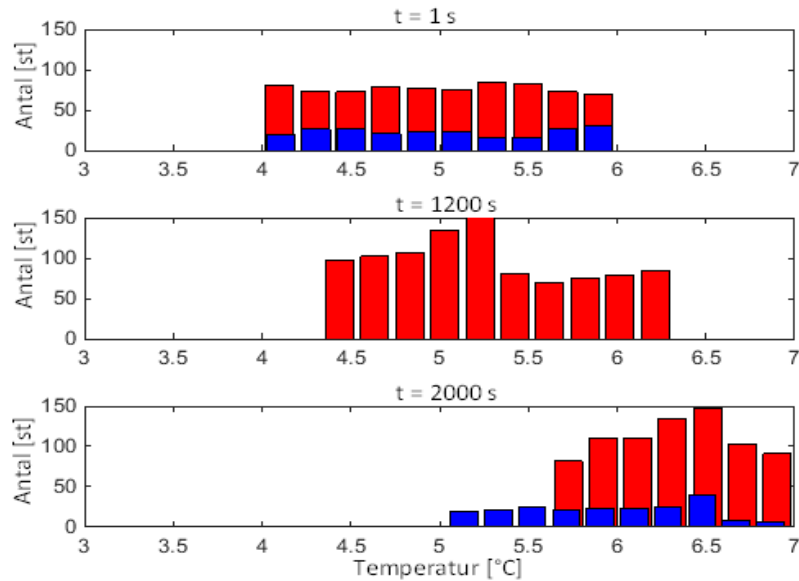
Vid en obalans på -100 MW stabiliseras frekvensen initialt vid -0,2 Hz. Efter ca 8 minuter börjar de enheter som stängdes av först att nå sin max-temperatur och slås på igen. I takt med att fler enheter behöver kylas ökar den totala effektförbrukningen tills dess att fler och fler enheter når sin min-temperatur. Kylskåpens cykler för effektförbrukning hamnar således i fas med varandra vilket medför att frekvensen oscillerar. På ett liknande sätt hamnar kylskåpens cykler i fas när en positiv obalans av samma storleksordning inträffar, vilket illustreras i Figur 19. Som resultatet i avsnitt 6.1.1 visade är reglerkapaciteten större för positiva obalanser. Det medför att frekvensen initialt stabiliseras vid 0,1 Hz vid en positiv obalans på 100 MW, jämfört med -0,2 Hz för en lika stor negativ obalans.



Figur 19. Steg störning på 100 MW vid  $t=1000$  s. Frekvensgraf: Störningens påverkan på frekvensen med kylskåpsreglering (blå) samt utan kylskåpsreglering (orange). Total effekt-graf: Effektförbrukning från kylskåpen.

Reglerkapacitetens uthållighet är kortare vid en positiv obalans på 100 MW jämfört med en negativ obalans av samma storleksordning, eftersom nedkylningen går snabbare än uppvärmningen.

Orsaken till det oscillerande beteendet som inträffar efter obalansen är att temperaturfördelningen för kylskåpen förändras och inte längre är jämnt utspridd över intervallet som den var innan störningen inträffade. Figur 20 visar detta för en stegstörning på -100 MW där de röda staplarna motsvarar avstängda kylskåp och de blå staplarna motsvarar påslagna kylskåp. Motsvarande graf för en stegstörning på 100 MW återfinns i Appendix C. Vid en mindre störning på -30 MW är fler kylskåp avstängda direkt efter störningen än initialt men fördelningen återgår därefter till 23 % på och 77 % av. När kylskåpen återgår till den ursprungliga fördelningen är medeltemperaturen högre än vid det initiala tillståndet eftersom referenstemperaturen har flyttats upp.



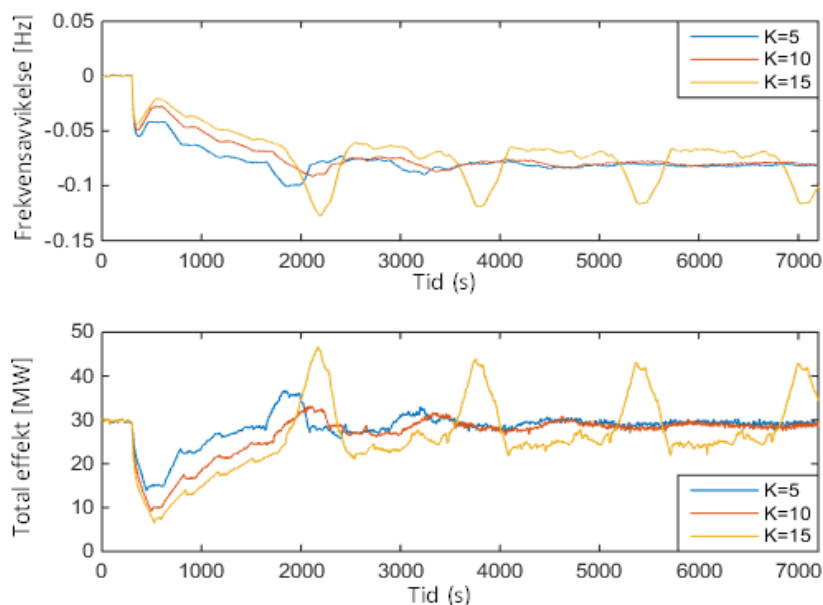
Figur 20. Steg störning på -100 MW vid  $t=1000$  s. Stapeldiagram över kylskåpens fördelning över temperaturspannet vid  $t=1$ ,  $t=1200$  och  $t=2000$  där röda staplar motsvarar avstängda kylskåp och blå staplar motsvarar påslagna kylskåp.

## 5.3 Känslighetsanalys

Denna studie baseras på flertalet antaganden och parametrar. Olika parametrar varierades en i taget för att visa hur de påverkar resultaten. För att validera modellen jämfördes även frekvensavvikelsen vid en stegstörning med resultatet från simuleringar i en modell som inte innehöll frekvensreglering från kylskåp. Jämförelsen visade att frekvensen går mot samma värde i båda modellerna. Detta kan ses i Figur 16 och 17 i kapitel 5.2.2.

### 5.3.1 K-värde

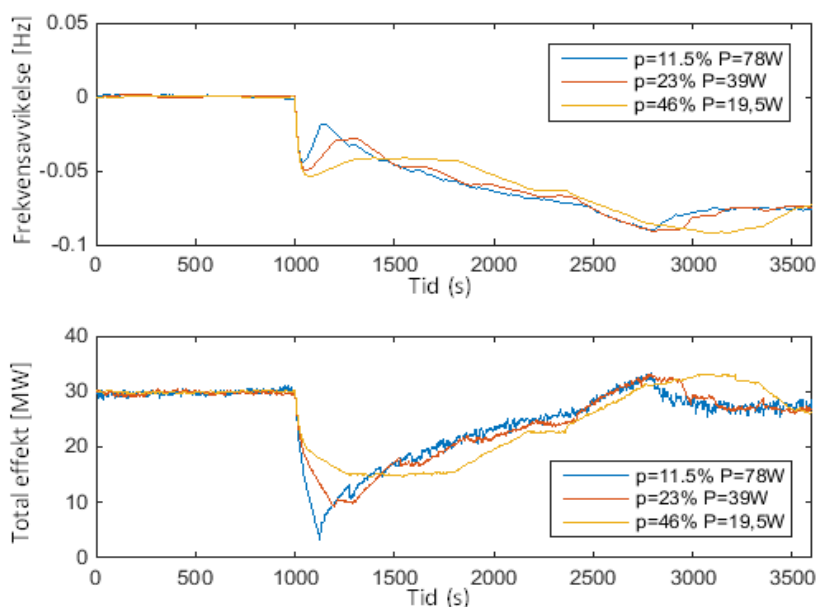
En viktig parameter i modellen är proportionalitetskonstanten  $K$  som bestämmer antalet kylskåp som ska styras. I studien sattes  $K$  till 10 för att flytta referenstemperaturen  $1$  °C vid en frekvensavvikelse på  $0,1$  Hz, vilket innebär att den maximala reglerkapaciteten sätts in.  $K$ -värdet varierades i simuleringarna för att utvärdera påverkan på resultatet. Figur 21 visar hur frekvensen och den totala effekten påverkas av en  $-30$  MW stegstörning för olika värden på  $K$ . Ett större värde på  $K$  innebär att fler kylskåp stängs av om frekvensen understiger  $50$  Hz, vilket leder till att frekvensen stabiliseras tidigare initialt. För  $K=15$  hamnar kylskåpen i fas vilket leder till att frekvensen oscillerar vid återkoppling. Det beror på att referenstemperaturen når sitt maximumvärde. För en  $-30$  MW obalans lämpar sig  $K=10$  eftersom frekvensens oscillerande kan undvikas. Med  $K=5$  bidrar färre enheter till att reglera obalansen och de kan vara avstängda under en längre tid. Detta sker i utbyte mot att frekvensen får sjunka mer. Grafen visar också att förändringen av effektbidraget inte är linjärt i förhållande till  $K$ .



Figur 21. Frekvensavvikelser och total effekt från kylskåpen vid en -30 MW störning för olika värden på  $K$ .

### 5.3.2 Anslutningseffekt och gångtid

För att studera hur det maximala effektbidraget och uthålligheten påverkas av anslutningseffekten varierades även denna parameter, se Figur 22. När anslutningseffekten varieras ändras även gångtiden. En dubbelt så stor anslutningseffekt medför hälften så kort gångtid och vice versa. Det innebär att effektförbrukningen i medel innan störningen är densamma.

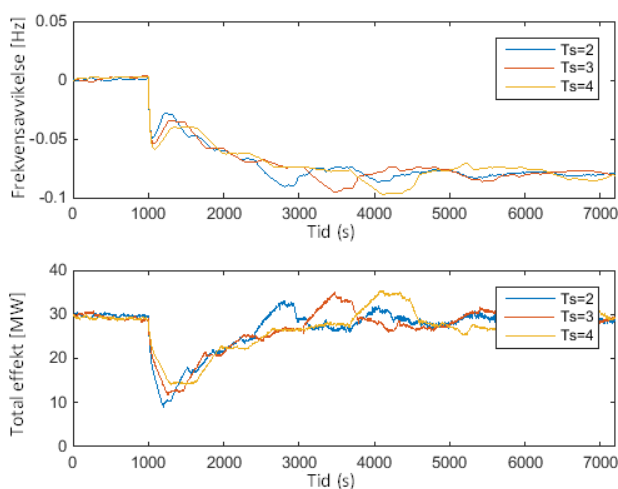


Figur 22. Frekvensavvikelse och total effekt från kylskåpen vid en störning på -30 MW för olika värden på kompressorns gångtid,  $p$ , och anslutningseffekt,  $P$ .

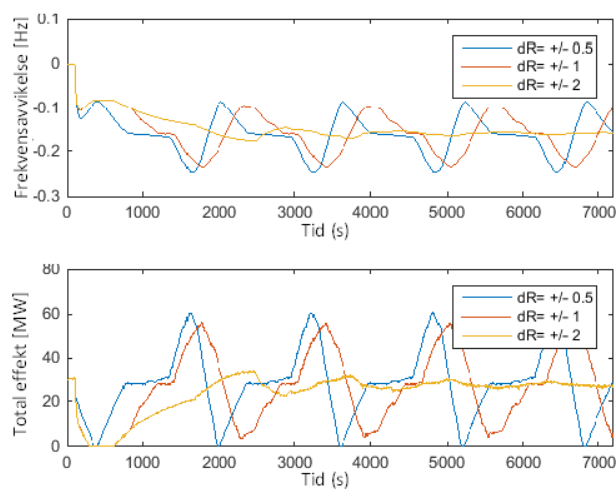
Analysen visar att kompressorns gångtid och anslutningseffekt påverkar effektbidraget i stor utsträckning även om medeleffekten är densamma innan störningen. En större anslutningseffekt och kortare gångtid medför större maximalt effektbidrag och snabbare aktivering, men sämre uthållighet. På motsvarande sätt medför en mindre anslutningseffekt och längre gångtid, en bättre uthållighet men ett lägre maximalt effektbidrag och långsammare aktivering. En gångtid på 46 % medför en uthållighet på ca 10 minuter, vilket är mer än tre gånger så lång uthållighet jämfört med en gångtid på 23 % vid motsvarande störning.

### 5.3.3 Temperatursvängning och referenstemperaturens gränser

Två viktiga parametrar i modellen är de spann som kylskåpens temperatur samt referenstemperaturen tillåts variera inom. I Figur 23 visas hur effekten och frekvensen påverkas av temperatursvängningen och i Figur 24 visas hur systemet påverkas av referenstemperaturens gränser.



Figur 23. Frekvensavvikelse och total effekt från kylskåpen vid en störning på -30 MW för olika värden på temperatursvängningen  $T_s$ .



Figur 24. Frekvensavvikelse och total effekt från kylskåpen vid en störning på -60 MW för olika värden på referenstemperaturens intervall  $dR$ .

Resultatet i Figur 23 visar på en avvägning mellan effektbidrag och uthållighet för olika värden på temperatursvängningen. En högre temperatursvängning medför mindre effektbidrag men längre uthållighet och vice versa. I Figur 24 framgår att kylskåpen kan hjälpa till att reglera för en störning som är större än deras totala kapacitet utan att hamna i fas då referenstemperaturen får variera  $\pm 2$  °C. Detta eftersom referenstemperaturens max- eller minvärde uppnås. Vid en störning på -60 MW nås däremot maxvärdet när referenstemperaturen tillåts variera  $\pm 0,5$  °C eller  $\pm 1$  °C och kylskåpens cykler hamnar därmed i fas.

En förändrad temperatursvängning påverkar inte värmeöverföringen utan kylskåpets temperatur stiger respektive sjunker med samma hastighet. Kylskåpets temperatur ökar med ca 1,5 °C på 15 minuter. En minskad temperatursvängning påverkar däremot cykeltiden i och med att gränsvärdena för max- och mintemperaturen nås snabbare. En temperatursvängning på 4 °C medför en cykeltid på ca 60 minuter. En halverad temperatursvängning medför hälften så stor cykeltid.

## 5.4 Sammanfattning av simuleringar

- Reglerkapaciteten är asymmetrisk på grund av kompressorns asymmetriska gångtid, kapaciteten är -30 MW för uppreglering och 66 MW nedreglering.
- Kylskåpen fungerar väl som reglerresurs då kontinuerliga obalanser undersöks, vilket antyder att de kan bidra med FCR-N.
- Aktiveringstiden är snabbare för nedreglering än uppreglering pga asymmetrisk reglerkapacitet.
- Då maximalt effektbidrag sätts in för uppreglering är uthålligheten längre än vid maximalt effektbidrag för nedreglering eftersom uppvärmningen går långsammare än nedkylningen.
- Kylskåpen uppfyller inte dagens krav på aktiveringstid och uthållighet för att bidra med FCR-N, FCR-D eller FRR-A.
- Kylskåpens uthållighet och aktiveringstid påverkas av frekvensavvikelsen. I takt med att mer reglerkraft sätts in, minskar frekvensavvikelsen och därmed derivatan av effektökningen.
- För flera av parametrarna, som K-värde, gångtid, anslutningseffekt och temperatursvängning, är ett högt eller lågt värde på parametern en avvägning mellan snabb aktiveringstid och stort effektbidrag eller lång uthållighet
- Intervallet som referenstemperaturen tillåts variera inom är avgörande för om kylskåpen hamnar i fas.

## 6. Erfarenheter från elbranschens aktörer

Förbrukningsflexibilitet som en del av smarta elnät omfattar många aktörer, allt från balansansvariga och elhandelsföretag till teknikföretag och branschföreningar. Intervjuer har genomförts med respondenter från Vattenfall, E.ON, Fortum, Jämtkraft, Electrolux samt Svensk Energi. Flera av aktörerna har egna pilotprojekt för att studera förbrukningsflexibilitetens potential. I detta kapitel presenteras några av deras erfarenheter med och åsikter om laststyrning.

### 6.1 Möjligheter och svårigheter med styrning

Ekonomiska incitament är det främsta motivet till styrning (Hjelm, 2015; Söderberg, 2015; Persson, 2015). Eftersom förbrukningsflexibilitet skapar en ny marknad har elbolagen möjlighet att utöka sina energitjänster så att kundernas förbrukning kan säljas på den nya marknaden (Hjelm, 2015). Både Söderberg (2015) och Hjelm (2015) lyfter också fram laststyrning som en möjlighet att agera på ett miljömedvetet sätt genom att minska behovet av fossilbaserad och dyr reglerkraft. Utöver ekonomiska motiv till styrning är det viktigt att marknaden och systemet fungerar väl och därför behöver systemet få in så mycket reglerresurser som möjligt (Persson, 2015).

Tidigare när Vattenfall hade ansvar för frekvensen var balanshållningen ett tillräckligt stort incitament för att ibland styra elpannors förbrukning, som ett alternativ till att starta gasturbiner. Eftersom Svenska kraftnät ansvarar för frekvensen sedan avregleringen tror Persson (2015) att det idag skulle krävas prissignaler från systemoperatören för att det ska bli aktuellt för de balansansvariga att använda sig av styrning. Ekblad (2015) tror att elhandelsföretagen är de aktörer som drar mest nytta av att erbjuda förbrukningsflexibilitet. En hållbar affärsmodell som gör att samtliga aktörer drar nytta av tjänsten är nödvändig men kan också vara orsaken till att utvecklingen av denna marknad inte går framåt (Ekblad, 2015). Fridenäs (2015) menar att alla som är inblandade vill se ekonomisk lönsamhet men ingen vill stå för kostnaderna. Kostnaderna för att producera styrbara produkter måste fördelas över flera aktörer menar Ekblad (2015). Dessutom tror Ekblad (2015) att elhandelsföretagen måste erbjuda ett avtal till kunderna med t.ex. lägre tariff i utbyte mot förbrukningsflexibilitet för att det ska vara lönsamt för kunden att välja en vitvara som är styrbar.

För att det ska finnas motiv till styrning behöver volymerna vara tillräckligt stora (Söderberg, 2015; Wiklander, 2015). Lundqvist (2015) menar att de ekonomiska incitamenten för kunden är för små i dagsläget eftersom elpriset och nättariffen är för låga. Hjelm (2015) menar att svårigheten ligger i att prisskillnaderna mellan olika timmar är för små och att nättariffen inte är dynamisk, vilket leder till att prisvolatiliteten medför otillräckliga incitament. För att laststyrning ska bli aktuell behöver priset variera (Wiklander, 2015). Priset för tjänsten behöver också vara högre än alternativpriset, som utgörs av spotpriset (Söderberg, 2015). Att elpriset till stor del utgörs av skatter samtidigt som det är många kunder som ska dela på pengarna bidrar

också till osäkerheter kring lönsamheten (Wiklander, 2015). Lundqvist (2015) menar vidare att prissättningen på balanstjänster eventuellt måste bli högre. Hur stort behovet av flexibla förbrukningstjänster blir och när tjänsterna fordras på systemnivå beror på utvecklingen av produktionsflottan i Norden och i Europa. Det finns redan idag ett behov av sådana tjänster för att hantera lokala svårigheter i områden som har mycket vindkraft (Lundqvist, 2015).

Hjelm (2015) tror att den mekanism som förbrukningsflexibilitet kommer att styras efter är elpriset och ser två varianter av marknadsmodeller. Den ena varianten är att kunden agerar på spotpriset och styr förbrukningen för att kunna minimera sin elkostnad. Den andra varianten är att elhandelsföretaget säljer förbrukningen på reglerkraftmarknaden när det är gynnsamt att handla, det vill säga då kapaciteten ger som bäst avkastning (Hjelm, 2015). Söderberg (2015) ser större potential i laststyrning som utförs av en balansansvarig aktör än den som utförs av kunderna själva. Om kunderna styr utifrån prissignaler så får de balansansvariga reagera på förändringar i förbrukning snarare än agera, vilket inte är fördelaktigt enligt Söderberg (2015). Även Persson (2015) menar att det antagligen kommer vara den balansansvariga som styr eftersom elpriset är för lågt för att kunderna ska bry sig om att ändra sitt beteende och styra sin förbrukning via prissignaler.

Hjelm (2015) ser obligatorisk reglering av systemfrekvensen som mindre relevant för elhandelsföretag eftersom det eliminerar den marknadskraft som förbrukningsflexibiliteten skulle kunna innebära. Lundqvist (2015) menar att tekniska krav och automatisk styrning kan vara bra som en sista åtgärd vid en viss yttre frekvensgräns för att säkerställa driftsäkerheten i systemet. Svensk Energi bedömer dock att automatisk styrning från systemoperatören ska omfatta så liten marknadsvolym som möjligt och att *marknaden* i möjligaste mån ska tillhandahålla de effekt- och balanstjänster som systemet och aktörerna behöver (Lundqvist, 2015).

Om förbrukningsflexibiliteten kan säljas till reglermarknaden som primär- eller sekundärreglering kan det bli aktuellt för de balansansvariga att styra förbrukningen menar Wiklander (2015) och Söderberg (2015). Att vindkraften ersätter en viss del av den kontrollerbara produktionen ger incitament till styrning eftersom detta kan medföra att vattenkraften inte räcker till som reglerkraft (Persson, 2015). Om de snabba förloppen från vindkraften kan hanteras med hjälp av förbrukningsflexibilitet så hinner andra resurser som reagerar långsammare komma in och bidra till stabilisering av systemet (Persson, 2015).

Utöver frekvensreglering är det också möjligt att flytta förbrukningen från hög- till låglasttimme inom dygnet, vilket kan ske utan inblandning av reglermarknaden (Wiklander, 2015). Att jämna ut effektvariationer i nätet är fördelaktigt ur ett nättekniskt perspektiv (Lundqvist, 2015). Då spotprognoser visar en skillnad mellan hög- och låglasttimme skulle lasten därför kunna flyttas inom dygnet, innan spotbudet är satt (Wiklander, 2015). Den flexibla kraften kan alltså säljas på spotmarknaden under dagen-före-handeln (Söderberg, 2015). Nätbolagen skulle också kunna schemalägga

viss förbrukning eller otillgängliggöra förbrukning vid vissa tider för att förebygga flaskhalsar i nätet (Hjelm, 2015).

Ytterligare en möjlighet är att flytta lasten *mellan* dygn, exempelvis skulle förbrukningen kunna skjutas till nästa dygn om prisprognosen indikerar lägre priser då. En faktor som påverkar spotpriset är vindkraftsproduktionen eftersom ett överskott på produktion kan orsaka låga spotpriser. Med en större andel vindkraft i systemet är det möjligt att priserna kommer att skilja ännu mer mellan olika dagar i framtiden, vilket skulle kunna ge incitament att skjuta på lasten dygnsvis (Wiklander, 2015).

Det kan finnas en intressekonflikt internt inom ett bolag där olika delar ser olika incitament till att styra (Söderberg, 2015). Försäljningssidan lägger störst vikt vid lönsamma och effektiva affärer medan produktionssidan även fokuserar på systemets funktionalitet (Persson, 2015). Även Hjelm (2015) lyfter fram denna problematik och påpekar att nätsidan skulle kunna använda förbrukningsflexibilitet för att optimera driften. Om styrningen sker för att förbättra nätsituationen kan det krävas ett närmare samarbete mellan nätbolag och produktionsbolag (Wiklander, 2015). En risk som kan uppstå då är att informationen på marknaden blir snedvriden och därför är det viktigt att alla aktörer får samma information och agerar utifrån samma förutsättningar menar Wiklander (2015). En intressekonflikt skulle även kunna uppstå mellan en balansansvarig och en annan aktör, t.ex. en aggregator. Om aggregatorn börjar styra kunders förbrukning på ett sådant sätt att den balansansvariges prognoser inte stämmer så måste den balansansvarige betala en avgift för obalansen. Detta kan antingen hanteras genom att den balansansvarige agerar som båda parter eller att det finns en slags kompensations-mekanism mellan balansansvarig och aggregator för berörda kunder (Hjelm, 2015). Persson (2015) menar att tjänsten bör tillhandahållas av den balansansvariga aktören och om en aggregator är inblandad ska denne vara balansansvarig.

## 6.2 Förbrukningsflexibilitet som reglerprodukt

Idag tillhandahåller E.ON all sin produktionskapacitet som upp- eller nedregleringsbud till elmarknaden. Samma sak skulle kunna göras på förbrukningssidan enligt Söderberg (2015) som ser en marknad för att styra, om möjligheten finns. Vilken marknad förbrukningsflexibiliteten kan säljas på beror på lasterna och hur de ställs in (Söderberg, 2015). Persson (2015) menar att det enklaste alternativet nog är att de balansansvariga säljer förbrukningsflexibiliteten som automatisk reglering till Svenska kraftnät.

Gustafsson & Thurin (2015) har i sitt examensarbete hos Fortum undersökt möjligheterna med Vehicle to Grid (V2G). V2G innebär att bilen kan ladda upp och ur beroende på olika signaler, vilket betyder att den kan fungera som en kontrollerbar last och generator till elnätet (Gustafsson & Thurin, 2015). Studien undersöker hur FCR-N kan fungera som signal för laststyrning av elbilar eftersom marknaden för FCR-N har lägst minimibud (0,1 MW). Fördelen med att styra på frekvens är att den är samma

överallt i Sverige, vilket gör den enkel att övervaka utan att behöva mäta vid varje laddare. Exempelvis skulle styrningen kunna gå till så att när frekvensen sjunker så skickas en signal till aggregatorn, som i sin tur sänder en signal till laddaren som elbilen är ansluten till, att batteriet ska ladda ur. Förloppet registreras i en smart mätare och kunden får sedan betalt för deltagandet (Gustafsson & Thurin, 2015). Elbilar utgör förhållandevis stora laster när de laddas, i jämförelse med hushållsapparater som har en låg elförbrukning (Hjelm, 2015). Därför menar Hjelm (2015) att det kan vara intressant att tillämpa laststyrning av elbilar. För att detta ska vara aktuellt krävs att intäkterna från att agera på marknaden är större än kostnaderna för det slitage som urladdning av batterierna medför (Gustafsson & Thurin, 2015). Vid deltagande på primärmarknaden får aktören alltid en kapacitetsersättning för den kapacitet som upphandlingen avser och en energiersättning vid de tillfällen då bud aktiveras (Bäck, 2015).

Tidigare har balansansvarsavtalet specificerat den minsta volymen för att delta med primärreglering i form av FCR-N och FCR-D. Eftersom den minsta volymen som planeringssystemet TRANS på Svenska kraftnät kan ta emot är 0,1 MW, tydliggörs det i balansansvarsavtalet 2015 att mindre volymer än så inte är tillåtna (Larsson, 2015). För de manuella reglerbuden finns krav på att de måste vara minst 5 MW i elområde 4 och 10 MW i resten av Sverige (Söderberg, 2015). Eftersom vissa marknader är stängda för mindre volymer och det finns ett tröskelvärde som måste överstigas innan det blir lönsamt att agera är det viktigt att förbrukningsflexibilitetens volym är tillräckligt stor (Söderberg, 2015). Persson (2015) menar att det blir svårt att få ihop så stora volymer som en enhet. För att budstorleken ska uppfylla kraven måste därför många enheter aggregeras så att det blir möjligt att agera på reglermarknaden. Där kan en aggregator spela roll för att styra förbrukningen på ett kontrollerat sätt (Hjelm, 2015). Persson (2015) menar att det i dagsläget är för komplicerat att aggregera små bud eftersom manuella avrop tillämpas. Vattenfall har idag förbrukningsbud på reglermarknaden från stora kunder eftersom dessa är lättare att hantera. Ju mindre kunderna är, ju mer automatiskt måste systemet vara (Persson, 2015). Ett system där Svenska kraftnät sätter ett visst pris som de balansansvariga får svara på tror Persson (2015) är att föredra.

Hur uthållig förbrukningsflexibiliteten är spelar roll för vilken typ av produkt den kan fungera som. Uthålligheten beror på vilken last som styrs men det måste finnas en viss marginal att nyttja flexibiliteten så att bortkopplingen har så liten aktiv närvaro som möjligt på kunden (Hjelm, 2015). För att lägga bud på sekundärmarknaden behöver lasterna kunna vara bortkopplade i en timme (Hansson, 2015). Ekblad (2015) ser stora möjligheter med att styra laster under ett kort tidsperspektiv, runt 10 minuter, och menar att potentialen är mindre om hushållslaster ska styras under en längre tid. Electrolux har utvecklat produkter som ska vara kompatibla med smarta elnät och styras efter prissignaler som fås via uppkoppling. Kompressorn ska klara att vara avstängd under en viss tid med hjälp av hög termisk massa och en fläkt som driver runt den kalla luften invändigt (Ekblad, 2015). Söderberg (2015) menar att om elhandelsföretaget säljer en *tjänst* istället för *el* så kan den balansansvariga aktören styra när elen ska levereras.

Tjänsten kan exempelvis vara att kylskåpet ska hålla en viss temperatur (Söderberg, 2015).

Hur snabbt lasterna behöver kunna kopplas bort beror på vilken marknad som avses (Hansson, 2015). Hjelm (2015) ser inte tidsaspekten som ett problem, varken att lasterna kopplas bort direkt eller att kundens förbrukning reserveras för bortkoppling vissa timmar. Persson (2015) menar att lasterna antagligen går att styra minst lika snabbt som produktionen, speciellt om förbrukningen styrs av frekvensen.

### 6.3 Påverkan på kraftsystemet

Vilken påverkan laststyrningen får på kraftsystemet beror på hur stora volymer som styrs och hur styrningen går till. Stora volymer medför bland annat att lastprognoserna påverkas (Wiklander, 2015). Förbrukningsmönstret som i nuläget har en efterfrågetopp på morgonen och en på kvällen kan förändras och därför måste prognostiseringen utvecklas och anpassas (Hjelm, 2015). Idag har nätägarna välkända lastprofiler och nätet är dimensionerat därefter. Flexibla tjänster skulle innebära nya utmaningar för de aktörer som har systemansvar på distributionsnivå eftersom det kan uppstå lokala problem som flaskhalsar (Lundqvist, 2015). Vid prognostisering i framtiden kanske det blir nödvändigt att ta hänsyn till spotprognoserna och hur stor andel av förbrukningen som är flexibel (Wiklander, 2015). I det fall då elbilar används som primärreglering kan en prognos göras utifrån kartläggning av körbeteenden, antal elbilar och batteriernas storlek (Gustafsson & Thurin, 2015).

Ur ett balansperspektiv kan det vara negativt om kunderna själva styr sin förbrukning utifrån spotpriset, i alla fall om det handlar om stora volymer. Risken finns att systemet kan bli självsvängande om många konsumenter samtidigt "springer och ställer sig på ena sidan av gungan" och sedan "springer åt andra hållet" när priset svänger (Söderberg, 2015). Om kunder börjar styra efter spotpris kan kraftsystemet hamna i obalans oftare under den initiala förändringsfasen och på lång sikt skulle spotpriset kunna jämnas ut (Hjelm, 2015). Ju närmre realtid, desto svårare blir det att prognostisera förbrukningsflexibiliteten (Lundqvist, 2015). Om den balansansvariga styr den flexibla förbrukningen borde noggrannheten för prognostisering istället förbättras och kontrollen av förbrukningen öka (Söderberg, 2015).

För att kunna handla med förbrukning på reglermarknaden måste det finnas möjlighet att mäta och följa upp hur mycket flexibel förbrukning som är tillgänglig och aktiverad, ungefär på samma sätt som för dagens reglerresurser (Wiklander, 2015) där de balansansvariga ska rapportera mätvärden i MW för FCR-N och FCR-D var tredje minut (Svenska kraftnät, 2012a). Vid en kommersiell marknad för förbrukningsflexibilitet är det viktigt att ha kontroll över hushållens förbrukning (Söderberg, 2015). Att veta hur stor volym en viss tjänst bidrar med är svårt och Lundqvist (2015) är övertygad om att det behövs mätning i hög upplösning, det vill säga för små kunder och nära realtid. Han menar dock att kostnads- och nyttoaspekten är viktig och behöver bedömas. Persson (2015) menar också att det krävs återkoppling från

de balansansvariga för att Svenska kraftnät ska veta att en viss mängd reglerats upp eller ned. Han tror dock att det kommer bli svårt att få exakta mätvärden på förbrukningen om den är utspridd. Däremot kan krav ställas på att de som lägger bud ska kunna mäta den totala förbrukningen innan och efter budet aktiveras. Om marknaden är effektiv kommer ungefär rätt mängd att aktiveras, vilket kanske får anses vara tillräckligt bra. Redan idag finns en osäkerhet kring förbrukningen och då korrigeras de framtida prognoserna efter historisk data. På samma sätt kan lärdomar dras av hur förbrukningsflexibiliteten sett ut historiskt när prognoser görs. En annan viktig aspekt som borde förbättra verifieringen är kortare avräkningsperioder (Persson, 2015).

Om många enheter ska aggregeras för att kunna bidra med flexibilitet under en längre tid kan styrningen bli avancerad och kräva central kommunikation (Wiklander, 2015). Söderberg (2015) menar att varje enskilt objekt behöver ha en styrenhet för att bidra med primär- eller sekundärreglering. Ur ett systemperspektiv borde central styrning vara säkrast för att lättare undvika problem som att för stor mängd förbrukning kopplas bort (Wiklander, 2015). Det är viktigt att beakta hur hela systemet påverkas när spelreglerna för flexibla tjänster utformas (Lundqvist, 2015). Wiklander (2015) menar att en kombination av centraliserad och decentraliserad styrning kanske är att föredra. Dock menar Lundqvist att central styrning inkräktar på marknaden och kundens fria vilja. Dessutom menar han att decentraliserad styrning kan vara nödvändigt vid kortslutningar eller stora momentana last- eller produktionsbortkopplingar eftersom det kan vara svårt att skicka styrsignaler ut till hela systemet tillräckligt snabbt vid central styrning (Lundqvist, 2015).

Det är svårt att förutse hur en viss tjänst påverkar systemet och olika aktörer. Det rör sig om komplexa mekanismer och de nya tjänsterna kan därför påverka systemet och marknaden på oväntade sätt (Lundqvist, 2015). Lundqvist (2015) menar att problematik som kan uppstå är flaskhalsbekymmer, spänningsproblematik samt prispåverkan på spotmarknaden och intradag-handeln. Komplexiteten gör också att behoven ibland kan se olika ut lokalt och systemmässigt vid en och samma tidpunkt, vilket kan ge motstridiga prissignaler till kunden. Kundens förbrukning kan alltså behöva styras på olika sätt beroende på vems behov som ska tillgodoses. Hela branschen behöver således fundera på hur tjänsterna ska utformas, hur prissignaleringen ska gå till samt vem som i första hand ska nyttja tjänsten ifrån kunden, om det är den lokala systemoperatören, regionnätägaren, den nationella systemoperatören eller marknaden (Lundqvist, 2015). Lundqvist (2015) tror att det är möjligt att lära sig att hantera detta på sikt genom att pröva sig fram.

Det kan finnas nätrelaterade risker ifall överbelastning uppstår när lasten kopplas tillbaka in på nätet. Om många förbrukningskällor kopplas tillbaka samtidigt så kanske effekttoppen inte undviks utan istället flyttas fram i tiden (Hansson, 2015). Lasterna drar också mer effekt momentant vid inkoppling jämfört med det effektuttag de har när de varit inkopplade en tid. Det kan medföra att effektförhållandet innan bortkoppling och efter återanslutning inte förhåller sig 1:1. Om det då rör sig om stora volymer

behöver bra styrmetoder och sekvensinkoppling tillämpas (Söderberg, 2015). Även Ekblad (2015) betonar vikten av att sekventiellt starta och stänga av produkter för att inte få ett överbelastat kraftsystem men menar också att det är de aktörer som förmedlar denna tjänst som får sköta detta. Ett sätt att undvika att apparaterna kopplas in samtidigt är att ha en tidsfördröjning på vissa enheter (Persson, 2015). Ett alternativ är att använda kvartsaffärer där återkoppling av lasten fördelas ut en kvart innan hel timme och en kvart efter hel timme (Hansson, 2015). Ett annat sätt är att återansluta en mindre mängd än vad som aktiverades. Eftersom den eventuella "återvändande lasten" kommer bete sig liknande från dag till dag går det att lära sig hur förhållandet mellan bortkopplad och återansluten effekt ser ut och kompensera för skillnaden (Persson, 2015). Persson (2015) anser därmed att den återvändande lasten inte utgör ett problem, speciellt inte vid frekvensreglering.

## 6.4 Sammanfattning av intervjustudie

Nedan sammanfattas möjligheter och svårigheter med förbrukningsflexibilitet för systemansvarig och balansansvariga aktörer.

- Ekonomiska incitament och möjlighet för elbolagen att utöka sina energitjänster är det främsta motivet till styrning. Förbrukningsflexibiliteten medför också miljömässiga fördelar.
- Behovet av reglerresurser ökar och de balansansvariga aktörerna ser potential att sälja förbrukningsflexibiliteten till reglermarknaden som primär- eller sekundärreglering när reglerkraftspriset är högt. Det finns därmed potential för systembaserad laststyrning.
- Lågt elpris, små prisskillnader mellan timmar och odynamisk nättariff medför små incitament för kunden att styra sin förbrukning (prisbaserad laststyrning)
- Lastprognoserna påverkas av förbrukningsflexibiliteten och det kan bli nödvändigt att ta hänsyn till spotpriset vid förbrukningsprognostisering
- Det är möjligt att göra prognoser för förbrukningsflexibilitet och vid effektiv utformning av marknaden kan aktiverad mängd förbrukningsflexibilitet anpassas efter behovet.
- Utöver frekvensreglering kan förbrukningsflexibilitet användas för att jämna ut effektvariationer, undvika flaskhalsar, hantera lokala svårigheter eller anpassas efter prisprognoser.
- Behoven av laststyrning kan se olika ut på lokal- och systemnivå vilket kan medföra motstridiga prissignaler. Intressekonflikter inom bolag och mellan aktörer kan uppstå.
- Volymen behöver vara tillräckligt stor för att förbrukningsbud ska kunna ges och hanteringen behöver ske automatiskt.
- Hur stor mängd förbrukningsflexibilitet som är tillgänglig och aktiverad behöver mätas och bra styrmetoder är nödvändigt.

## 7. Analys och diskussion

Denna studie undersöker potentialen att använda kylskåp som reglerresurs men lyfter också fram potentialen för laststyrning av andra hushållsapparater. Hushållens totala potential har i tidigare studier uppskattats till mellan 500-1500 MW. Krav på ökad andel förnybar energi och integrering av elmarknader i EU gör förbrukningsflexibilitet intressant som reglerresurs eftersom detta krav medför ett ökat behov av reglerresurser. Vindkraftsutbyggnaden i Sverige väntas medföra ett ökat behov av primärregleringsresurser på 60 MW. Denna studie visar att kylskåpens reglerkapacitet kan täcka en del av det ökade behovet. Behovet av sekundärreglering väntas öka med så mycket som mellan 500-1400 MW. Om förbrukningsflexibilitet används som primärreglering kan resurser från vattenkraften frigöras och istället användas som sekundärreglering.

Den undersökta potentialen för kylskåp i denna studie visar på en reglerkapacitet på 30 MW uppreglring och 66 MW nedreglering. En studie av Elforsk visar som tidigare nämnts en reglerkapacitet på 300 MW för kylskåp och frysar (Elforsk, 2013). Skillnaderna beror delvis på att frysar inte räknats in i denna studie. Det framgår inte av Elforsks studie vilka andra antaganden som skiljer men nedan listas två antaganden som påverkar kapaciteten:

- Den *installerade* effekten för kylskåp i denna studie beräknades till totalt 130 MW men detta innebär inte att reglerkapaciteten är 130 MW eftersom 23 % av kylskåpen konsumerar energi medan 77 % inte konsumerar energi initialt. Kompressorns gångtid är därför av stor vikt för reglerkapaciteten.
- Kapaciteten kan beräknas utifrån total installerad effekt i dagsläget eller utifrån ett framtidsscenario där kylskåpen är mer energieffektiva. I denna studie ansågs det rimligare att beräkna reglerkapaciteten utifrån antagandet att den mest energieffektiva tekniken används (energiklass A+++)<sup>1</sup> eftersom det ansågs troligt att ny teknik, som automatiska frekvensreglerande chip, installeras i *nya* hushållsapparater.

Det simulerade värdet för kylskåpens uppreglringseffekt uppgick till 30 MW. Detta överensstämmer med det beräknade värdet och innebär att alla enheter kan vara avstängda samtidigt under en viss tid. Vid ett antagande om att alla kylskåp kan slås på samtidigt beräknades nedregleringskapaciteten till 100 MW men simuleringarna visar att den maximala nedregleringskapaciteten endast är 66 MW. Det beror på att det tar olika lång tid för nedkylning och uppvärmning. Eftersom nedkylning går snabbare än uppvärmning hinner de kylskåp som slogs på först att stängas av innan de sista enheterna slås på. Det innebär att alla enheter aldrig kommer att vara på samtidigt om kylskåpets temperatur måste hållas inom max- och mingränserna.

Ett ojämnt förhållande mellan hur stor del av tiden som hushållsapparaterna konsumerar respektive inte konsumerar energi medför asymmetrisk reglerkapacitet. Om det är viktigt att reglerstyrkan är lika stor för upp- som nedreglering är det således fördelaktigt

att använda hushållsapparater som har en gångtid på ungefär 50 %. Eftersom det finns frysar som har en gångtid på närmare 50 % kan dessa bidra med en mer symmetrisk reglerkapacitet än kylskåp. En annan möjlighet är att använda hushållsapparater som är varvtalsstyrda, en teknik som dessutom blir allt vanligare för kylskåp. För att dra några slutsatser om huruvida reglerkapaciteten är mer symmetrisk för varvtalsstyrda apparater behöver simuleringar för detta göras. Att varvtalsstyrda apparater inte behöver slås på eller av kan också vara fördelaktigt om resurserna ska bidra med FCR-N, som aktiveras kontinuerligt.

De beräkningar och simuleringar som gjorts i denna studie visar att lastkurvans påverkan på reglerkapaciteten är liten. För uppreglering framgår små skillnader i reglerkapacitet mellan hög- och låglasttimmar. Kylskåpens maximala effektförbrukning för nedreglering skiljer sig också mellan lasttimmarna men maximalt effektbidrag är detsamma, 66 MW. Det beror på att nedregleringskapaciteten inte endast begränsas av hur många kylskåp som är avstängda initialt utan också av att nedkylningen går snabbare än uppvärmningen. Att denna studie visar på små variationer i reglerkapacitet under dygnet beror på att kylskåpen inte uppnår så stora volymer. Om det är en större volym som varierar mellan 89–114 % av medeleffektförbrukningen kan dock skillnaderna medföra avsevärda variationer i reglerkapacitet. Styrningen i sig medför också att reglerkapaciteten ändras i takt med att fördelningen mellan enheter som konsumerar och inte konsumerar energi förändras. Styrningens påverkan på reglerkapaciteten är dock större än lastkurvans påverkan.

Simuleringarna visar att kylskåpen aktiveras tillräckligt snabbt för att bidra med FCR-N vid mindre positiva obalanser. Däremot uppfylls inte kraven på aktiveringstid för negativa obalanser. Att aktiveringstiden skiljer sig för negativa och positiva obalanser av samma storleksordning beror på att kapaciteten för nedreglering är större än kapaciteten för uppreglering. Kraven på FCR har tagits fram utifrån vattenkraften som befintlig reglerresurs. Om styrningen utformas på samma sätt som i denna studie behöver dessa krav om möjligt omformuleras något, för att kylskåpens ska kunna utnyttjas som reglerresurs. För stora störningar (>1000 MW) aktiveras 50 % av kylskåpens reglerkapacitet inom 5 sekunder. Däremot överskrids kravet på full utreglering inom 30 sekunder, det tar ungefär 6 gånger längre tid än så att reglera ut hela kapaciteten. Utifrån de krav på aktiveringstid som ställs på FCR-D, lämpar sig därför inte denna typ av styrning av kylskåp som automatisk störningsreserv. Aktiveringstiden beror på att det tar en viss tid för temperaturen i kylskåpen att nå den nya max- eller mingränsen även om referenstemperaturen flyttas direkt. Att 50 % aktiveras snabbt beror på att frekvensavvikelsen är som störst i början och mängden effekt som aktiveras är proportionell mot frekvensavvikelsen och K-värdet. I takt med att mer reglerkraft sätts in, minskar frekvensavvikelsen och därmed effekttökningen. Aktiveringstiden kan justeras med hjälp av K-värdet.

Om styrningen utformats genom linjär förflyttning av referenstemperaturen så påverkas uthålligheten, det vill säga hur länge kylskåpen kan fungera som reglerresurs, av hur

stor obalansen i kraftsystemet är. Förhållandet mellan obalansens storlek och uthålligheten är inte linjärt och skiljer sig mellan positiva och negativa störningar. Det gör att det kan vara svårt att förutse uthålligheten. Då maximal reglerkapacitet sätts in är uthålligheten för uppreglning större än vid nedreglering. Även i detta fall kan asymmetrin bero på att nedkylningen som sker när kylskåpet är på går snabbare än uppvärmningen som sker då kylskåpet är avstängt. Känslighetsanalysen visade att kompressorns gångtid även har stor betydelse för uthålligheten, när gångtiden höjdes till 46 % så tredubblades uthålligheten. Detta antyder att det även ur uthållighetssynpunkt kan vara mer fördelaktigt att använda frysar, som har en längre gångtid, för frekvensreglering. En annan möjlighet som kan förbättra uthålligheten är om frekvensstyrning implementeras för kylskåp som är utvecklade för att kunna vara avstängda under en tid. Uthålligheten kan även justeras med hjälp av K-värdet. Om K-värdet är lägre så kan kylskåpen bidra med effekt under längre tid eftersom färre enheter sätts på eller stängs av. Däremot kommer frekvensavvikelsen tillåtas bli större. Resultatet blir därför en avvägning mellan frekvensavvikelse och uthållighet. Uthålligheten beror även av temperatursvängningen och ju högre temperatursvängningen är, desto längre är uthålligheten.

Med de max- och mingränser för kylskåpets temperatur, samt den linjära styrning som tillämpats i denna studie är kylskåpen inte tillräckligt uthålliga för att uppfylla dagens krav för någon av reglerprodukterna. För störningar som medför att alla enheter stängs av är uthålligheten för uppreglning ca 8 minuter enligt simuleringarna. Om denna typ av styrning ska användas som automatisk störningsreserv (FCR-D) innebär det att manuella reserver behöver aktiveras snabbare än inom 15 minuter. FCR-N och FRR-A ges som bud på timbasis. Det är inte säkert att dessa produkter behöver vara fullt utreglerade eller aktiverade hela timmen men i teorin behöver de kunna vara det, vilket kylskåpen inte skulle klara enligt denna studie. Idag är inte kraven på uthållighet specificerade för FCR-N men sådana krav kan behöva specificeras om förbrukningsflexibilitet från temperaturreglerande apparater ska användas som normaldriftsreglering.

En fördel med att låta kylskåp eller andra temperaturreglerade hushållsapparater bidra till FRR-A är att produkten endast är aktiverad under vissa timmar på dygnet. Hushållsapparaterna skulle därmed kunna återgå till normal drift under de timmar produkten inte är aktiverad. Dessutom är kylskåpens reglerkapacitet i ungefär samma storleksordning som den volym Sverige bidrar med till FRR-A. Dock visar simulering med olika stegstörningar att kylskåpen inte uppfyller kraven för aktiveringstid samt att de stabiliserar frekvensen vid en nivå skild från 50 Hz. Eftersom FRR-A ska återställa frekvensen till det nominella värdet, verkar kylskåpen inte lämpa sig som FRR-A om styrningen sker genom att förflytta referenstemperaturen.

Eftersom laststyrning av kylskåp medför ökade temperaturfluktuationer har styrningen en påverkan på livsmedlens hållbarhet, sett ur ett livsmedels-tekniskt perspektiv. Det är dock inte säkert att styrningen har någon påverkan på livsmedlen ur ett konsument-

tekniskt perspektiv, eftersom produkterna ofta är deklarerade för en högre temperatur än den som hålls i kylskåpet. Det innebär att produkterna ofta konsumeras med god marginal innan de blir dåliga. Kravet på tidsavvikelse innebär att den genomsnittliga referenstemperaturen i kylskåpen kommer att vara samma som utan styrning eftersom frekvensen i kraftsystemet är 50 Hz i genomsnitt, vilket också är bra ur ett konsumentperspektiv. Om medeltemperaturen med och utan styrning är samma borde även effektförbrukningen i genomsnitt vara densamma. Kravet på tidsavvikelse kan även vara fördelaktigt enligt resonemanget med symmetri i reglerresursen, då kylskåpens temperatur kan jämföras med vattennivån i vattenkraftsmagasinen, som bör hållas kring ett visst värde för att alltid kunna bidra med reglerkraft.

Simulering av kontinuerliga obalanser under två timmar visar att kylskåpen fungerar bra som en del av den svenska normaldriftsreserven eftersom kylskåpen bidrar till att jämna ut fluktuationerna i frekvensen under hela det tidsspännat. Trots att kylskåpen är av diskret natur (på/av) kan de i aggregerad form bidra med ett gradvist frekvenssvar. Kylskåpen fungerar väl som reglerresurs så länge kylskåpen får arbeta inom sitt linjära arbetsområde. När referenstemperaturens max- eller mingränns uppnås hamnar kylskåpens cykler i fas vilket medför problem med en återvändande last som är större än den last som kopplades bort. Simuleringar visar att referenstemperaturens gränser har en avgörande påverkan på om kylskåpen hamnar i fas. För att inte enheterna ska hamna i fas vid ett tidigt skede är det därför viktigt att referenstemperaturens tillåtna intervall är så stort som möjligt. På så sätt klarar kylskåpen av att hantera större obalanser. Att referenstemperaturens max- och mingränser är en avgörande faktor för den återvändande lasten antyder att problematiken med att kylskåpen hamnar i fas kanske kan undvikas om styrningen inte sker genom att flytta referenstemperaturen inom ett givet intervall.

Den återvändande lasten kan momentant vara större än vad resultatet från denna studie visar eftersom startströmmen och den högre effektförbrukningen vid startögonblicket inte simulerats i denna studie. Att kylskåpen riskerar att hamna i fas kan antagligen undvikas om en slumpfaktor används vid styrningen så att enheterna återansluts med hjälp av en slumpmässig tidsfördröjning. Den slumpmässiga tidsfördröjningen bör då vara minst 5-10 minuter eftersom kompressorns livslängd riskerar att förkortas om kompressorn slås på direkt efter att den stängts av. Fridenäs (2015) och Ekblad (2015) menar dock att påverkan på kompressorns livslängd av att kylskåpen styrs är försumbar.

För att undvika det oscillerande beteende som beskrivits, kan andra typer av styrning vara bättre lämpade för frekvensreglering. Det är möjligt att utforma styrningen så att en slumpmässig men proportionell bortkoppling sker med hjälp av gränsvärden för när frekvensen understiger vissa värden. Detta skulle medföra en snabbare aktiveringstid. Flera av elbranschens aktörer menar att lastbortkopplingen kan ske i stort sett momentant. Om styrningen utformas på ett annat sätt än att referenstemperaturen flyttas skulle antagligen temperatursvängningen vara större och uthålligheten längre än i denna

studie. Då slumpmässig bortkoppling tillämpas istället för att de kallaste enheterna stängs av riskerar dock maten i kylskåpen att påverkas i högre utsträckning.

Ett alternativt sätt att styra är att införa ett dödband som gör att regulatören inte reglerar direkt på avvikelser i nätfrekvensen. Vid ett dödband styrs många enheter till att slås på eller kopplas bort samtidigt och regleringen blir därmed inte lika kontinuerlig. Denna typ av styrning kan därför användas vid störningsreglering men vid normaldriftsreglering är antagligen linjär styrning att föredra. Om kylskåpen endast används som FCR-D skulle referenstemperaturen kunna variera fritt och temperaturen tillåtas vara högre än den tidigare max-gränsen under en kort tid. Som känslighetsanalysen visade ökar temperaturen i kylskåpet med ca 1,5 °C på 15 minuter. Om vissa enheter hade en temperatur på 7 °C innan störningen innebär det att temperaturen för dessa enheter överstiger 8 °C innan de manuella buden ska ha reglerat ut störningen. Eftersom Livsmedelsverket inte rekommenderar att temperaturen överstiger 8 °C innebär detta en risk för maten. Om detta ändå anses acceptabelt under korta tidsperioder skulle kylskåpens uthållighet kunna uppfylla kravet på 15 minuter.

Aktörerna har olika uppfattning om vem som ska ansvara för att styra lasten och hur styrningen ska gå till. En fördel med central styrning är att den är lätt att övervaka. Dock kan central styrning via systemoperatören vara avancerad och inkräkta på marknaden och kundens fria vilja. Decentraliserad styrning, exempelvis utifrån frekvensen i nätet, är enklare att utforma men är istället svårare att kontrollera. Respondenterna menar att sekventiell återanslutning är nödvändig om en stor mängd last styrs och att detta behöver hanteras automatiskt.

Om stora volymer last styrs påverkas lastprognoserna. Därför kan det i framtiden bli nödvändigt att ta hänsyn till spotprognoserna när förbrukningen prognostiseras. Om de balansansvariga styr förbrukningen kan detta övervakas på ett bättre sätt jämfört med om kunderna själva styr, vilket är fördelaktigt för de balansansvariga och systemoperatören. Elbranschens aktörer framhäver att det är viktigt att kunna mäta och följa upp hur mycket förbrukningsflexibilitet som finns tillgänglig och är aktiverad samt att det krävs en återkoppling till systemoperatören. Det är också viktigt att känna till reglerkapaciteten väl då förbrukningsflexibilitet används som reserv eftersom den påverkar storleken på den eventuella återvändande lasten. Flera av respondenterna menar att det är möjligt att lära sig hur tillgängligheten för förbrukningsflexibilitet ser ut och göra prognoser utifrån historisk data.

Elbranschens aktörer kan ha olika motiv till att använda sig av förbrukningsflexibilitet. Från intervjuerna har det framgått att den ekonomiska och marknadsmässiga aspekten är av stor vikt för att det ska finnas incitament att styra laster. Prisvolatiliteten är i dagsläget för liten för att ge ekonomiska incitament för kunderna att själva styra sin förbrukning (prisbaserad laststyrning). Däremot framkom det under intervjuerna att flera aktörer ser potential i att erbjuda förbrukningsflexibilitet som reglerkraft när reglerpriset är högt (systembaserad laststyrning). Flera aktörer har lyft elbilars potential vid laststyrning på grund av att elbilar utgör en stor momentan last och att aggregering

av dessa medför volymer som är mer gynnsamma att handla med än exempelvis kylskåp. Aktörerna menar att styrningen bör påverka kunden så lite som möjligt och därför lyfts automatisk styrning av hushållsapparater fram som en möjlighet. Vid aggregering av förbrukningsflexibilitet menar några av respondenterna att aggregatorn också behöver vara balansansvarig. Flertalet aktörer har även nämnt att bud på manuell reglerkraft är en möjlighet. Om förbrukningsbud lämnas som FRR-M aktiveras förbrukningsflexibiliteten endast då buden avropas. För att förbrukningsflexibilitet ska kunna utgöra reglerprodukter på marknaden skulle kraven för reglerprodukterna behöva göras om till viss del. Budgivningen behöver automatiseras och det skulle även underlätta om kravet på minsta budvolym minskades.

Från intervjuerna framkom att det är viktigt att se till systemperspektivet när flexibla tjänster utformas och att det kan vara svårt att se hur en viss tjänst påverkar systemet eftersom det är komplext. Exempelvis kan motstridigheter gällande styrningen uppstå om behoven för laststyrning ser olika ut lokalt och systemmässigt. En viktig fråga är då vilka behov som ska prioriteras och vilken aktör som ska få tillgång till förbrukningsflexibiliteten. En annan viktig aspekt vid utformning av laststyrning är omställningsperioden. Även om systemnyttan ökar ju fler automatiska frekvensstyrda chip som installeras så är den fullständiga omställningsperioden 15 år. Om denna typ av lösning ska implementeras, måste det ske nu.

## 8. Slutsats

Det finns goda möjligheter för kylskåp att bidra med automatisk frekvensreglering eftersom de flesta hushåll i Sverige har ett kylskåp. Laststyrningen har dessutom liten påverkan på kunden och kylskåpen kan bidra med en jämn reglerkapacitet under året. Enligt simuleringarna i denna studie är den maximala uppregeringskapaciteten från kylskåp 30 MW och nedregleringskapaciteten är 66 MW. Resultatet visar därmed att reglerkapaciteten för upp- och nedreglering av kylskåp är asymmetrisk. Kompressorns gångtid har en stor påverkan på reglerkapaciteten och denna parameter är därför vital när potentialen för hushållsapparater undersöks. Simuleringarna visar också att styrning genom linjär förflyttning av referenstemperaturen, inom vissa tillåtna gränser, kan medföra att kylskåpens cykler hamnar i fas. Det ger upphov till effekttoppar och effektdalar, vilket medför en negativ påverkan på kraftsystemet eftersom frekvensen pendlar. Det är viktigt att utforma laststyrning så att detta beteende undviks och det kan därför vara lämpligt att undersöka andra typer av styrning. Studien visar ändå att kylskåp kan användas som en del av den automatiska frekvensregleringen men att vissa krav gällande aktiveringstid och uthållighet kan behöva omformuleras. Resultaten från denna studie visar att den reglerprodukt som kylskåpen passar bäst som är FCR-N.

Behovet av reglerresurser ökar och det finns potential att sälja aggregerad förbrukningsflexibilitet från hushåll som reglerresurs. Det är då viktigt att det finns en återkoppling mellan aktören som säljer förbrukningsflexibiliteten och systemoperatören gällande hur mycket förbrukningsflexibilitet som finns tillgänglig och är aktiverad. Denna studie visar på många möjligheter med systembaserad laststyrning som också är att föredra ur systemoperatören och de balansansvarigas perspektiv, eftersom den bidrar till en bättre balanshållning och kontroll.

## Referenser

- Angeli, D. & Kountouriotis, P.-A., 2012. A stochastic approach to dynamic-demand refrigerator control. *IEEE Transactions on control systems technology*, 20(3), s. 581-592.
- Bartusch, C., 2011. *Boosting behavioral change in residential electricity consumption: Demand response programs and feedback*, Västerås: Mälardalen universitet.
- Bevrani, H., 2007. *Robust Power System Frequency Control*. New York: Springer.
- Broberg, T. o.a., 2014. *En elmarknad i förändring: Är kundernas flexibilitet till salu eller ens verklig?*, u.o.: Energimarknadsinspektionen.
- Cheng, W. L., Mei, B. J., Huang, Y. H. & Yuan, X. D., 2013. A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: an experimental investigation. *Energy*, 36(2011), s. 5797-5804.
- Douglass, P. J. o.a., 2013. Smart Demand for Frequency Regulation:. *IEEE Transactions on smart grid*, 4(3), s. 1713-1720.
- Ea Energy Analyses, 2013. *Electricity demand as frequency controlled reserve*, u.o.: u.n.
- Elforsk, 2013. *Efterfrågefleksibilitet på en energy-only marknad: Budgivning, nättariffer och avtal (Elforsk rapport 13:95)*, Stockholm: Elforsk.
- Elforsk, 2013. *Övergripande drivkrafter för efterfrågefleksibilitet: Hinder, möjligheter och alternativa utvecklingsvägar (Elforsk rapport 12:73)*, Stockholm: Elforsk.
- Elforsk, 2014. *Elkonsumenters drivkrafter för en ökad förbrukningsfleksibilitet. Hushålls attityder och anpassningar till en tidsdifferentierad och effektbaserad elnätstari*ff (Rapport 14:41), u.o.: Elforsk.
- Energimarknadsinspektionen, 2013. *Ei:s beredning av ärendet*. [Online] Hämtad: [http://www.ei.se/Documents/Projekt/Natkoder/Natkod\\_Demand\\_Connection\\_DCC.pdf](http://www.ei.se/Documents/Projekt/Natkoder/Natkod_Demand_Connection_DCC.pdf) [Använd 18 05 2015].
- Energimyndigheten, 2009a. *Sverige ledande på kyl och frys: var skåpet ska stå*, Eskilstuna: Statens energimyndighet.
- Energimyndigheten, 2009b. *End-use metering*, u.o.: u.n.
- Energimyndigheten, 2013a. *Utmaningar för den nordiska elmarknaden (ER 2013:14)*, Eskilstuna: Statens energimyndighet.
- Energimyndigheten, 2013b. *Energimyndigheten - Kärnbränsle*. [Online] Hämtad: <http://www.energimyndigheten.se/Statistik/Tillforsel/Karnbransle/> [Använd 17 06 2015].

- Energimyndigheten, 2014. *Kortsiktsprognos: Över energianvändning och energitillförsel år 2014-2016 (ER 2014:14)*, Eskilstuna: Statens energimyndighet.
- Energimyndigheten, 2014. *Vad avgör ett vattenkraftverks betydelse för elsystemet: underlag till nationell strategi för åtgärder inom vattenkraften (ER 2014:12)*, Eskilstuna: Statens energimyndighet.
- ENTSO-E, 2012a. *Network code for requirements for demand connection: explanatory note 27 June 2012*, Bryssel: ENTSO-E.
- ENTSO-E, 2012b. *Network code on demand connection: Frequently asked questions 21 December 2012*, Bryssel: ENTSO-E.
- ENTSO-E, 2012c. *How can the Demand Connection Code facilitate Demand Side Response measures across Europe*, Bryssel: ENTSO-E.
- ENTSO-E, 2012d. *ENTSO-E Network code on Demand Connection 21 December 2012*, Bryssel: ENTSO-E.
- EON, 2011. *Smarta elnät för ett hållbart energisystem i Hyllie*. [Online] Hämtad: [https://www.eon.se/upload/eon-se-2-0/dokument/om\\_eon/om\\_energi/sustaninable-city/Ansokan-Energimyndigheten-2011-09-21.pdf](https://www.eon.se/upload/eon-se-2-0/dokument/om_eon/om_energi/sustaninable-city/Ansokan-Energimyndigheten-2011-09-21.pdf)  
[Använd 30 03 2015].
- Eriksson, M. & Sandwall, J., 2014. *Möjligheter och hinder för aggregerad förbrukningsflexibilitet som en produkt på reglerkraftmarknaden*, Uppsala: Uppsala universitet.
- Export Group 3, 2015. *Regulatory recommendations for the deployment of flexibility*, Bryssel: Smart Grids Task Force.
- Frey, H., 2009. *Case Studies: results and conclusions D6.2 of WP 6 from the Smart-A project*, u.o.: Energie Baden-Württemberg AG.
- Glad, T. & Ljung, L., 2006. *Reglerteknik grundläggande teori*. Lund: Studentlitteratur.
- Lundqvist, J., 2013. *Vad väntar egentligen runt hörnet? Om morgondagens elsystems funktion, dess mekanismer och om nya regelverk*, Stockholm: Svensk Energi.
- Marcus-Möller, C., 2006. *Demand as frequency controlled reserve – analysis of technology and potentials*, Kongens Lyngby: Danmarks Tekniske Universitet.
- Modin, R. & Lindblad, M., 2011. *Förvara maten rätt så håller den längre - vetenskapligt underlag om optimal förvaring av livsmedel (rapport 20)*, u.o.: Livsmedelsverket.
- Mökander, J., 2014. *Demand response in the future Swedish electricity market: a typology based on cost, volume and feasibility*, Linköping: Linköpings universitet.
- Nyeng, P., Östergaard, J., Togeby, M. & Hethey, J., 2010. *Design and implementation of frequency-responsive thermostat control*. Cardiff, Wales, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010, 45th International.

- Persic, S., 2007. *Frekvensreglering i det nordiska kraftsystemet*, u.o.: Svenska kraftnät.
- Saarinen, 2014. *A hydropower perspective on flexibility demand and grid frequency control*, Uppsala: Uppsala universitet.
- Short, J. A., Infield, D. G. & Freris, L. L., 2007. Stabilization of grid frequency through dynamic demand control. *IEEE Transactions on power systems*, 22(3), s. 1284-1293.
- SOU, 2013. *Ny tid ny prövning- förslag till ändrade vattenrättsliga regler: Delbetänkande av vattenverksamhetsutredningen (2013:69)*, Stockholm: Statens offentliga utredningar.
- Stadler, M., Krause, W., Sonnenschein, M. & Vogel, U., 2007. *The adaptive fridge: comparing different control schemes for enhancing load shifting of electricity demand*. Waszsawa, Shaker Verlag.
- Stamminger, R., 2008. *Synergy potential of smart appliances: D2.3 of WP 2 from the Smart-A project*, u.o.: University of Bonn.
- Statistiska Centralbyrån, 2015a. *Antal hushåll i tusental efter hushållstyp*. [Online] Hämtad: <http://www.scb.se/sv/Hitta-statistik/Statistik-efter-amne/Hushallens-ekonomi/Inkomster-och-inkomstfordelning/Hushallens-ekonomi-HEK/7289/7296/Antal-hushall/163554/> [Använd 23 02 2015].
- Statistiska Centralbyrån, 2015b. *Antal lägenheter efter hustyp*. [Online] Hämtad: <http://scb.se/sv/Hitta-statistik/Statistik-efter-amne/Boende-byggande-och-bebyggelse/Bostadsbyggande-och-ombyggnad/Bostadsbestand/87469/87476/374826/> [Använd 20 05 2015].
- Svalstedt, C. & Löf, M., 2014. *Smart Customer Gotland (CIRED Paper 0116)*. Rom, CIRED Workshop.
- Svensk Energi, 2015. *Ett regelverk för en europeisk energimarknad*. [Online] Hämtad: <http://www.svenskenergi.se/Vi-arbetar-med/Fragor-K-O/Network-Codes/> [Använd 04 05 2015].
- Svenska kraftnät, 2011a. *Elmarknaden i Sverige och Svenska kraftnäts roll (Faktablad)*. Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2011b. *I samhällets tjänst (faktablad)*. Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2012a. *Regler för upphandling och rapportering av primärreglering FCR-N och FCR-D (faktablad)*. Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2012b. *Avtal om Balansansvar för el mellan Affärsverket svenska kraftnät ("Svenska kraftnät")*. Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2013a. *Integrering av vindkraft*, Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2013b. *Perspektivplan 2025: en utvecklingsplan för det svenska stamnätet*, Sundbyberg: Svenska kraftnät.

- Svenska kraftnät, 2013c. *Svenska kraftnäts införande av LFC (automatisk FRR)*, Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2013d. *Network Code on Demand Connection (Remissvar)*. Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2014. *Kraftbalansen på den svenska elmarknaden vintrarna 2013/2014 och 2014/2015*, Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Svenska kraftnät, 2015a. *Drift och marknad*. [Online] Hämtad: <http://www.svk.se/stamnatet/drift-och-marknad/> [Använd 05 05 2015].
- Svenska kraftnät, 2015b. *Frequency Quality Project Presentation 2015-04-16*. Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- Vattenfall, 2015. *Vattenfall ändrar inriktning för drifttid för Ringhals 1 och 2*. [Online] Hämtad: <http://corporate.vattenfall.se/press-och-media/nyheter/2015/april/vattenfall-andrar-inriktning-for-drifttid-for-ringhals-1-och-2/> [Använd 11 05 2015].
- Westberg, A., 2012. *Analysis of a load frequency control implementation in Swedish run-of-river hydropower stations*, Uppsala: Uppsala universitet.
- Xu, Z., Ostergaard, J. & Togeby, M., 2011. Demand as Frequency Controlled Reserve. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3), s. 1062.
- Xu, Z., Togeby, M. & Ostergaard, J., 2008. *Demand as Frequency Controlled Reserve*, Köpenhamn: Technical University of Denmark.

## Appendix A

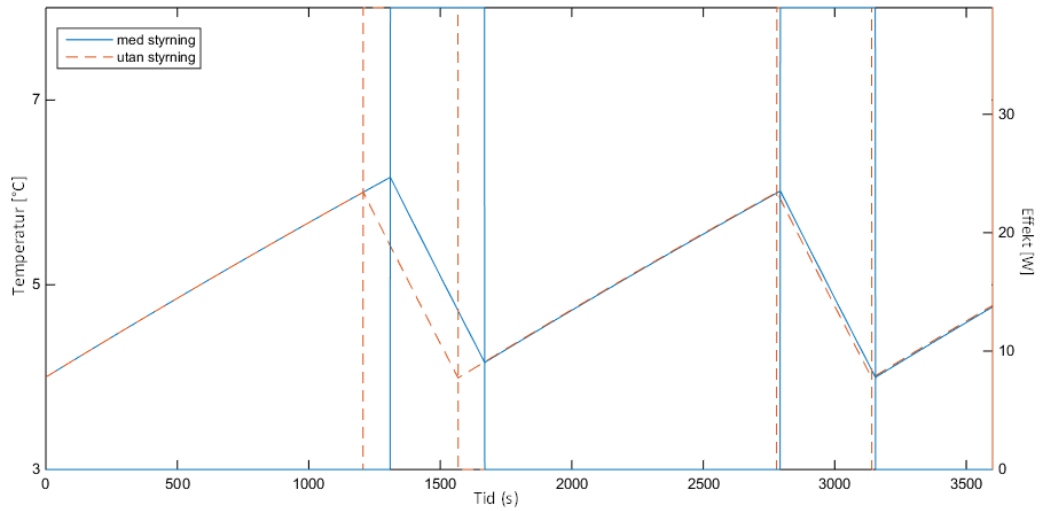
En jämförelse mellan parametervärden som används i denna studie och i tidigare studier.

Tabell A1. Parametervärden

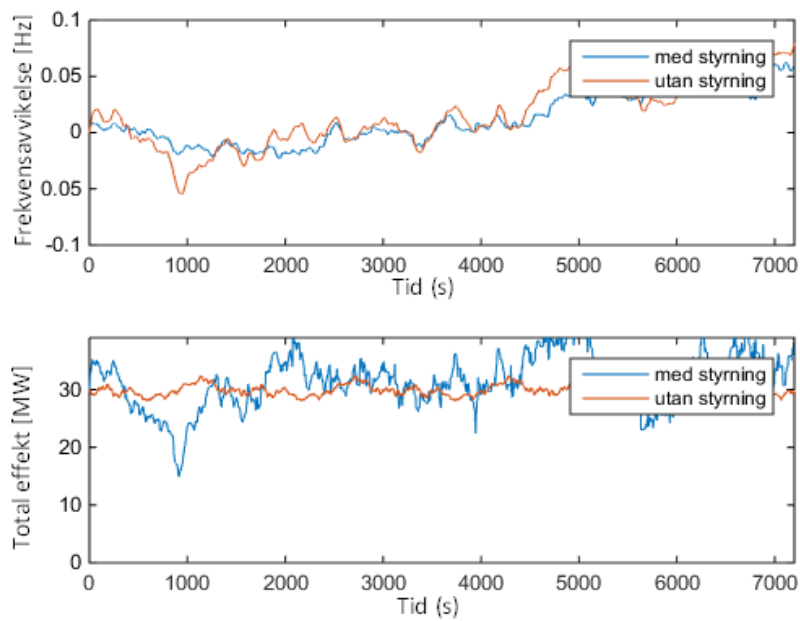
Parameter	Beskrivning	Parametervärden	Källa
$P$	Kylskåpets anslutningseffekt	70 W	(Stadler, et al., 2007)
		138 W	(Stamminger, 2008)
		39 W	(Fridenäs, 2015)
$Ua$	Termisk isolering	1,3695 W/°C	(Fridenäs, 2015)
$U$	U-värde	0,6 W/m <sup>2</sup> K	(Short, et al., 2007) <sup>3</sup>
		0,2672 W/m <sup>2</sup> °C	(Fridenäs, 2015)
$a$	Area	2 m <sup>2</sup>	(Short, et al., 2007)
		5,1262 m <sup>2</sup> (Mått 1,8x0,595x0,623 m)	(Fridenäs, 2015)
$mc_p$	Termisk massa	7,9 – 31,94 kWh/°C	(Short, et al., 2007)
		16,5 kJ/K	(Fridenäs, 2015)
$COP$	Power using factor, coefficient of performance	3	(Marcus-Möller, 2006)
		3,06	(Fridenäs, 2015)
$p$	Kylskåpets gångtid	22 %	(Stadler, et al., 2007)
		32 %	(Douglass, et al., 2013)
		33,3 %	(Stamminger, 2008)
		ca 20 %	(Fridenäs, 2015)
$min$ – $max$	Temperaturspann	3 °C-8 °C	(Stadler, et al., 2007)
		3 °C-7 °C	(Fridenäs, 2015)
$T_{rum}$	Rumstemperatur	25 °C	(Short, et al., 2007)
		25 °C	(Fridenäs, 2015)

<sup>3</sup> (Short, et al., 2007) modifierar U-värdet så att deras simuleringar stämmer överens med deras uppmätta värden

## Appendix B

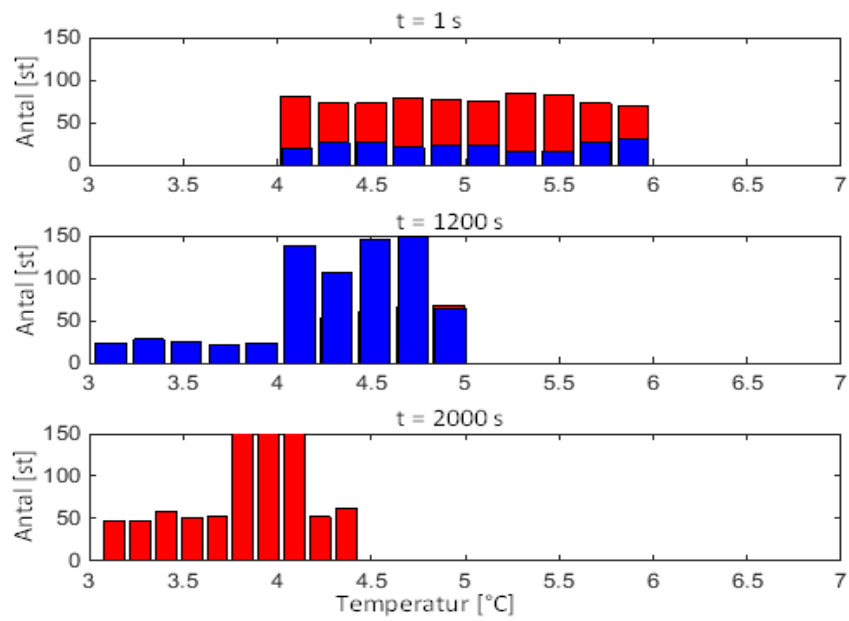


Figur A1. Temperaturvariation samt effektbehov hos ett kylskåp med styrning (blå) och utan styrning (orange) då nätfrekvensen initialt understiger 50 Hz (de första 1500 s).



Figur A2. Nätfrekvensen och den totala effekten med styrning (blå) och utan styrning (orange) då nätfrekvensen initialt understiger 50 Hz (de första 1500 s).

## Appendix C



Figur A3. Steg störning på 100 MW vid  $t=1000$  s. Stapeldiagram över kylskåpens fördelning över temperaturspannet vid  $t=1$ ,  $t=1200$  och  $t=2000$ .