

**Suomen CHP laitosten potentiaali sähkön reservimark-  
kinoilla**  
**CHP plants potential on the electricity reserve market in  
Finland**  
Pekka Maasilta

# TIIVISTELMÄ

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Pekka Maasilta

## **Suomen CHP laitosten potentiaali sähkön reservimarkkinoilla**

2018

Kandidaatintyö.  
27 s.

Tarkastaja: Juha Haakana

Sähköntuotanto ja markkinat ovat tällä hetkellä murrosvaiheessa, koska uusiutuvat sähkön-tuotantomuodot ovat yhä suurempi osa kapasiteettia. Tämä luo paineita sähkön toimintavar-muudelle ja mahdollisen säädön toteutukselle. Tässä kandidaatintyössä on tarkasteltu kirjal-lisuustutkimuksen ja haastattelun avulla CHP-laitosten mahdollista potentiaalia osallistua käyttö- ja häiriöreservimarkkinoille.

Työssä on ensin yleisesti kerrottu CHP-laitoksista ja sähkönreservimarkkinoista, sekä mitä reservimarkkinoilla oleminen edellyttää voimalaitokselta. Neljännessä kappaleessa on hie-man syvennytty CHP-laitosten mahdollisiin ajotapoihin markkinoilla ja viimeisessä kappala-leessa on tarkasteltu suomen CHP-laitosten kokonaispotentiaalia.

Tutkimuksen perusteella reservimarkkinoilla oleminen tuottaa laitokselle lisätuloja, mutta säätösähkömarkkinoiden vaatimukset osoittautuvat erittäin haastaviksi CHP-laitoksille. Po-tentiaalisimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui satunnainen osallistuminen säätösähkön tunti-markkinoille, koska CHP-laitokset soveltuvat paremmin lyhytaikaiseen säätöön ja etenkin jos se on hieman ennakoitavissa. Suomessa CHP-laitokset tuottavat myös kolmasosan säh-köntuotannosta ja tulevaisuudessa laitokset voivat olla myös osana säätövoimaa.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Pekka Maasilta

### **CHP plants potential on the electricity reserve market in Finland**

2018

Bachelor's Theses  
27 p.

Examiner: Juha Haakana

Electricity production and the market are currently in the process of transition because renewable energy is increasingly part of the total capacity in electricity production. This creates pressure on the reliability of the electricity and balancing capacity. In this bachelor's thesis it's researched as a literature study and an interview about the potential of CHP plants to participate in the FCR-N and FCR-D markets.

At the beginning there is general information about CHP plants and the electricity supply market and which requirements power plant need to meet in the reserve market. The fourth part is about the potential driving habits of CHP plants in the reserve market and the last part has examined the total potential of CHP plants in Finland.

According to the study, being on the reserve market produces revenue for the plant, but the requirements of the balancing capacity market prove to be very challenging for CHP plants. The most potential option was the temporary participation in the balancing capacity market, because CHP plants are more suitable for short-term power control especially if it is slightly predictable. CHP plants also produce one third of electricity generation and in the future plants can also be part of the balancing capacity in Finland.

## Sisältö

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	5
1. Johdanto.....	6
2. CHP-laitosten monipuolisuus.....	7
2.1 CHP-laitos.....	7
2.2 CHP-laitoksen tekniikka.....	8
2.3 Kaukolämmön varastointi.....	9
2.3.1 Kaukolämpöverkkoon varastointi.....	9
2.3.2 Terässäiliö.....	9
3. Sähkön reservimarkkinat.....	10
3.1 Reservilajit.....	10
3.2 Taajuuden vakautusreservit.....	11
3.2.1 FCR-N.....	11
3.2.2 FCR-D.....	12
3.3 Taajuuden vakautusreservien hankinta ja markkinat.....	13
3.3.1 Vuosimarkkinat.....	13
3.3.2 Tuntimarkkinat.....	14
3.4 Reservimarkkinoiden muuta vaatimukset.....	14
4. CHP-laitos reservimarkkinoilla.....	16
4.1 Sähköntuotannon säätely.....	16
4.1.1 Säätelyn toteutustavat.....	18
4.2 Tuotannon kannattavuus.....	19
4.2.1 CHP-laitoksen teoreettinen osallistuminen säätömarkkinoille.....	19
4.3 CHP-laitoksen kyky toimia reservimarkkinoilla.....	20
5. CHP-laitosten kokonaispotentiaali suomessa.....	22
5.1 Sähköntuotannon osuus.....	22
5.2 Nimellinen tuotantoteho.....	23
5.3 Mahdollinen säätövoima.....	24
6. Johtopäätökset.....	25
Lähdeluettelo.....	26

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

FCR-N	Frequency containment reserve for normal operation, taajuusohjattu käyttöreservi
FCR-D	Frequency containment reserve for disturbances, taajuusohjattu häiriöreservi
Rakennussuhde	Sähköntuotannon suhde lämpöenergian tuotantoon
CHP	Combined Heat and Power
MWh	Megawattituntia
MW	Megawatti
Hz	Hertsi
EDI	Electronic Data Interchange, tiedonsiirtomuoto sähköiseen kaupankäyntiin
MSCONS	Metered Services Consumption Report, mittausjärjestelmä sähköiseen kaupankäyntiin

## 1. JOHDANTO

Sähköntuotannossa eletään murroskautta, eli fossiilisia polttoaineita pyritään korvaamaan uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla. Kansainvälisillä ilmastopimuksilla pyritään vähentämään hiilidioksidipäästöjä, joka lisää uusiutuvan energian käyttöä. Aurinko- ja tuuli-voimaloiden lisääntyessä säätösähkön merkitys kasvaa, koska sähköverkoissa kysynnän ja tarjonnan on täsmättävä jatkuvasti. Tämän takia sähkönsäätövoiman tarve tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Suomessa on paljon CHP-laitoksia, joilla saattaisi olla potentiaalia sähkönsäätövoimaan.

Työn tavoitteena on selvittää suomen CHP-laitosten potentiaalia ja soveltuvuutta sähkönsäätömarkkinoille. Yleensä CHP-laitos toimii kaukolämmön tarpeen mukaan ja sähköä tuotetaan, jotta pystytään hyödyntämään kokonaisenergia mahdollisimman tehokkaasti. Tavoitteena on tuoda esille uusia vaihtoehtoja CHP-laitoksille sähkömarkkinoilla. Työssä pyritään myös selvittämään onko laitoksilla valmiuksia sähköntuotannon automaattiseen säätelyyn ja onko se ylipäänsä kannattavaa, sekä kertomaan mitä reservimarkkinoilla toimiminen vaatii. Tavoitteena on myös luoda kokonaiskuva suomen CHP-laitoksista ja niiden yhteisistä potentiaaleista sähköntuotannossa ja mahdollisesti osana kysyntäjoustoa.

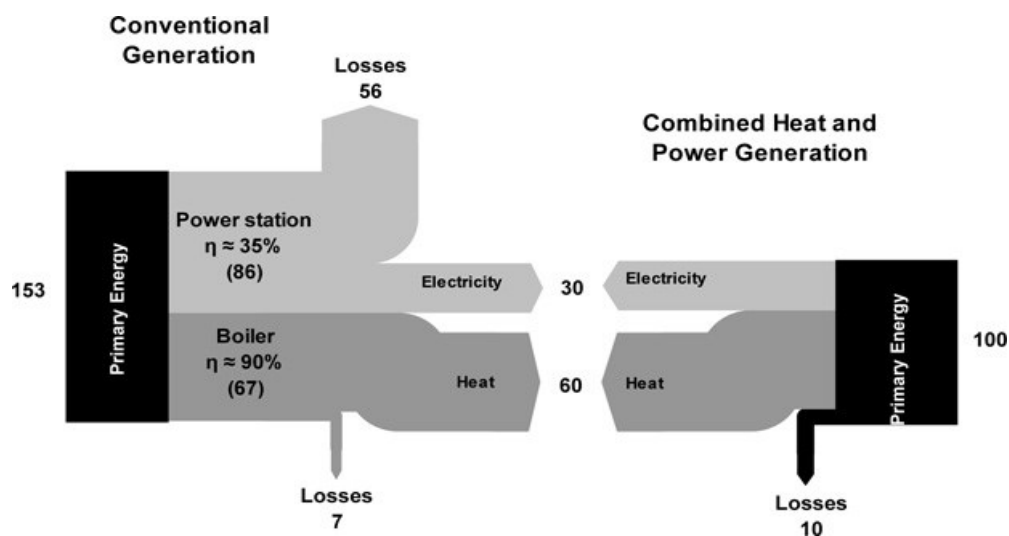
Työ toteutetaan pääosin kirjallisuuskatsauksena ja tietoa haetaan artikkeleista, tutkimuksista, väitöskirjoista sekä tilastoista. Niiden pohjalta tehdään johtopäätökset yleisellä tasolla. Tutkimukseen sisältyi myös yksi haastattelu, jossa haastateltiin energia-alan professoria aiheesta.

## 2. CHP-LAITOSTEN MONIPUOLISUUS

CHP-laitokset ovat erittäin olennainen osa sähkö- ja kaukolämpöverkkoamme. CHP-laitos on yleisnimitys eri laitoksista, jotka tuottavat sähköä ja lämpöä. Laitokset voivat polttaa haketta tai vaikka öljyä. Tässä kappaleessa kerron yleisesti CHP-laitosten monipuolisuudesta esimerkiksi polttoainensuhteen. Käyn myös läpi sen tekniikkaa yleisellä tasolla ja avaan hieman kaukolämmön varastointimahdollisuuksia.

### 2.1 CHP-laitos

CHP eli sähkön ja lämmön yhteistuotannossa tuotetaan samanaikaisesti sähköä sekä lämpöä. Sähköä tuotetaan normaalisti verkkoon myytäväksi ja lämpö hyödynnetään kaukolämpönä tai teollisuuden prosessilämpönä. CHP-laitosten etuna on korkea hyötysuhde verrattuna erillistuotantoon. Tämä johtuu siitä, että CHP-laitoksissa pystytään hyödyntämään käytettyä prosessihöyryä kaukolämpönä, kun taas esimerkiksi lauhdevoimalaitoksessa se jäähdytetään takaisin kiertoon. CHP-laitokset ovat yleensä vastapainevoimalaitoksia ja niiden hyötysuhde voi olla jopa 90% kun taas saman sähkön ja lämmön erillistuotannossa hyötysuhde olisi vain 44%. (Huhtinen, 2000).

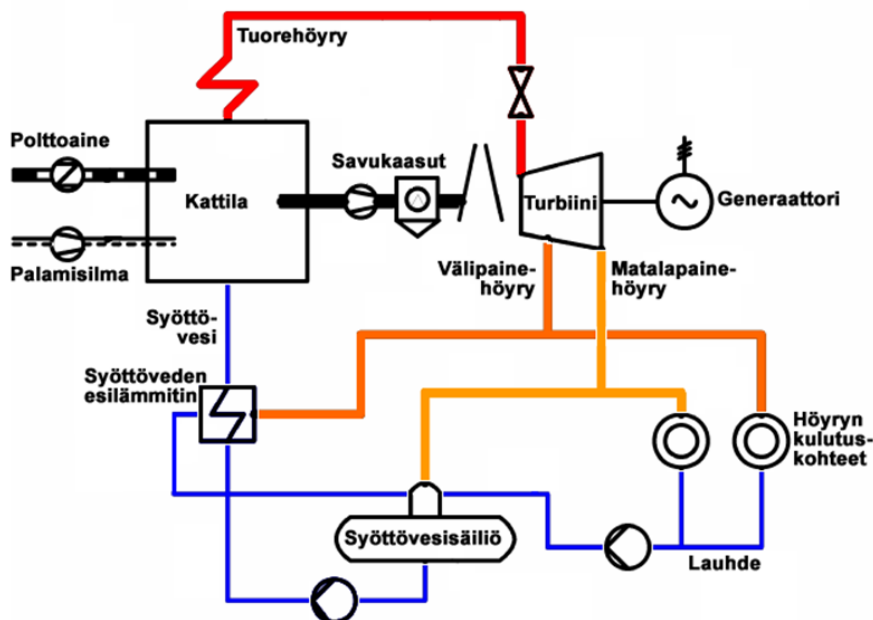


Kuva 2.1. kuvaa yhteistuotannon energian säästöä verrattuna erillistuotantoon. (IEA, 2008)

CHP-laitosten monipuolisuus on myös niiden etuna, sillä niiden polttoaineena voidaan käyttää uusiutuvaa energiaa tai maakaasua. (tilastokeskus, 2015). Ilmastopolitiikan ja kansain-

välischen sopimusten pohjalta päästövähennystavoitteet ovat suosineet uusiutuvien energianlähteidenkäyttöä CHP-laitoksissa. Suomessa suurin osa CHP-laitosten polttoaineista on peräisin uusiutuvista energianlähteistä kuten metsäteollisuuden jäteliemistä tai erilaisista puu-polttoaineista. Tämä tuo kilpailuetua laitoksille, sillä tulevaisuudessa pyritään luopumaan fossiilista polttoaineista lähes kokonaan. (valtio, 2016). Laitoksia on rakennettu metsäteollisuuden yhteyteen, koska niiden teollisuusjätteet soveltuvat polttoaineeksi, sekä useat tehtaot tarvitsevat prosessihöyryä muun muassa kuivaukseen.

## 2.2 CHP-laitoksen tekniikka



Kuva 2.2. Vastapainevoimalaitoksen prosessikaavio (Kyamk)

CHP-laitoksen toimintaperiaate selviää yksinkertaistetusti oheisesta kuvasta 2. Ensin polttoaine poltetaan kattilassa muuttaen sen kemiallinen energia lämpöenergiaksi. Polttoaine voi muun muassa olla uusiutuvaa energiaa kuten kuorta/haketta tai se voi olla kaasua. Syntynyt lämpöenergia siirretään kattilassa kiertävään veteen, joka muuttuu höyryksi ja jota tulistetaan vielä lopuksi. Tulistetun höyryn tyypillinen lämpötila on 450-550 °C ja paine 100-220 baaria. Höyry ohjataan turbiiniin, jossa se alkaa paisua ja näin pyörittämään sitä. Turbiiniin kiinnitetty generaattori alkaa pyöriä samalla ja tuottaa sähköä. Osa turbiinin höyrystä ohjataan syöttöveden esilämmittämiseen hyötysuhteen parantamiseksi. Turbiinin jälkeen jäähty-



nyt höyry/vesi ohjataan lämmönvaihtimeen, jossa sen lämpöenergia siirretään kaukolämpöverkostoon. Jäähdyntynyt vesi ohjataan takaisin vesisäiliöön, josta se päätyy takaisin kierron alkuun eli kattilaan. (Huhtinen, 2000)

## **2.3 Kaukolämmön varastointi**

Kaukolämmön varastoinnissa ylimääräinen kaukolämpö varastoidaan myöhempää käyttöä varten muun muassa tasoittamaan sen kulutushuippuja. Varastoinnin voi toteuttaa: Terässäiliöllä, kalliosäiliöllä, betonisäiliöllä, suljettavalla altaalla tai käyttää itse verkkoa varaajana. Reservimarkkinoiden mukainen ajotapa vaatisi etenkin lyhytaikaista varastointia johon soveltuisivat parhaiten terässäiliö tai itse verkko. (Koskelainen, 2006, s.383)

### **2.3.1 Kaukolämpöverkkoon varastointi**

Kaukolämpöverkkoon varastoidessa nostetaan menoveden lämpötilaa. Menoveden lämpötilan nostaminen sopii hyvin lyhytaikaiseksi varastoinniksi ja tätä käytetään etenkin huippukuormien hallintaan. Koko kaukolämpöverkon varasto riittää yleensä noin 0,5-1 tunniksi ja lämpötilaa nostamalla 5-15 astetta se riittää noin 2-3 tunniksi. Ylilämmön synnyttämä lämpövarasto purkautuu lämpötilarintaman saavuttaessa kuluttajalaitteet. Varastoinnin ansiosta voidaan tuottaa muun muassa tilapäisesti enemmän sähköä. (Koskelainen, 2006, s.389)

### **2.3.2 Terässäiliö**

Terässäiliö on kuin suuri termospullo, eli erillinen eristetty lieriönmuotoinen säiliö. Pienemmät terässäiliöt rakennetaan normaalisti paineellisiksi ja suuremmat kustannussyistä paineettomiksi. Paineettomissa säiliöissä veden lämpötila ei voi nousta yli 100 asteeseen ja pienet paineelliset säiliöt rakennetaan normaalisti kaukolämpöverkon paineen mukaan, jottei tarvitse rakentaa erillistä paineensäätöasemaa. (Koskelainen, 2006, s.386)

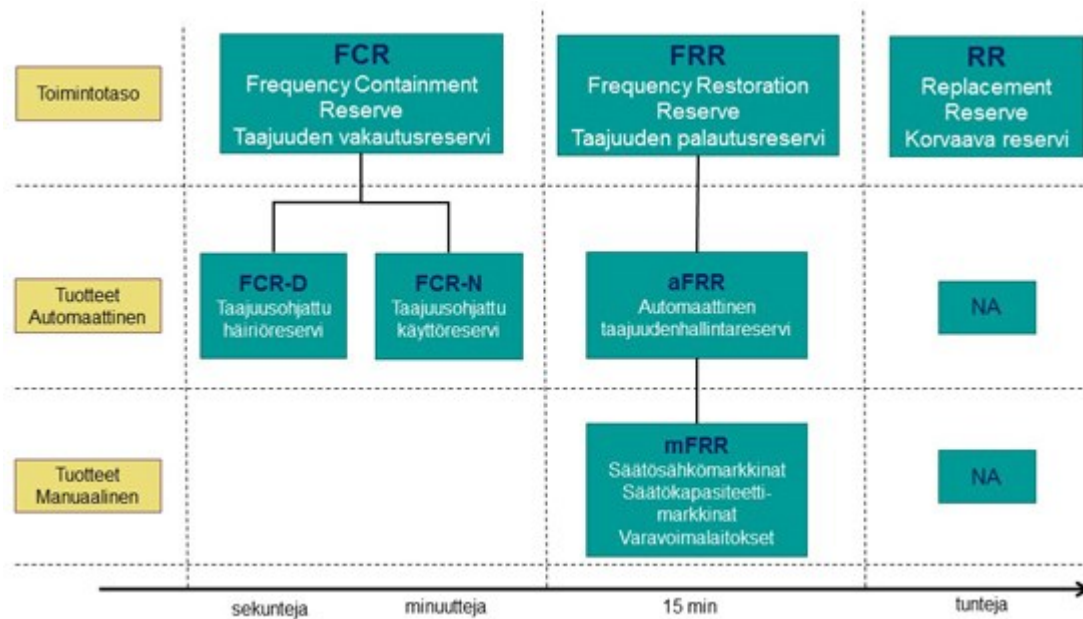
Espooseen on muun muassa rakennettu suomen suurin kaukolämpöakku, joka varastoi 800MWh lämpöenergiaa, mikä vastaa 13 000 omakotitalon lämmönkulutusta päivässä. (Ikkala, 2015)

### **3. SÄHKÖN RESERVIMARKKINAT**

Sähkön kulutuksen ja tuotannon pitää täsmätä joka hetki, eli niin sanottu tehotasapaino tulee säilyttää. Jos esimerkiksi kuormat lisääntyvät suhteessa tuotantoon verkon taajuus alkaa laskea. Taajuuden laskiessa 47,5-47 Hz osa tuotannosta alkaisi vähitellen irtoamaan verkosta, jolloin koko verkon pimeneminen olisi mahdollista. (Gan, 2016) Tämän takia sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat etukäteen tuotannon ja kulutuksen, mutta kuitenkin poikkeamia syntyy. Erojen tasoittamiseen käytetään reservejä, joita Fingrid kilpailuttaa ja hankkii markkinoiden ylläpitämiseen. Tässä kappaleessa kerron lyhyesti eri reservilajeista ja keskityn enimmäkseen taajuuden vakautusreserveihin. Kappaleessa kerrotaan myös mitä vuosi- ja tuntimarkkinoille osallistuminen vaatii.

#### **3.1 Reservilajit**

Sähkömarkkinoiden reservit voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään niiden tarkoituksen perusteella. Nämä kolme eri ryhmää ovat hyvin esitelty oheisessa kuvassa. Ensimmäinen ryhmä on taajuuden vakautusreservi, jota käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Tämä reservi on täysin automaattinen. Toinen ryhmä on taajuuden palautusreservi, jonka tarkoituksena palauttaa taajuus takaisin normaalille taajuusalueelle ja samalla vapauttaa vakautusreservit uudelleen käyttöön. Kolmas ryhmä on korvaavat reservit ja niiden tehtävä on vielä varmistaa häiriötilanteiden jälkeinen sähkön saatavuus. Työssäni keskityn enimmäkseen taajuuden vakautusreserveihin ja tutkin niiden taloudellisia mahdollisuuksia CHP-laitoksille. (Fingrid, 2017)



Kuva 3.1. Sähkömarkkinoiden reservilajit. (Fingrid, 2016)

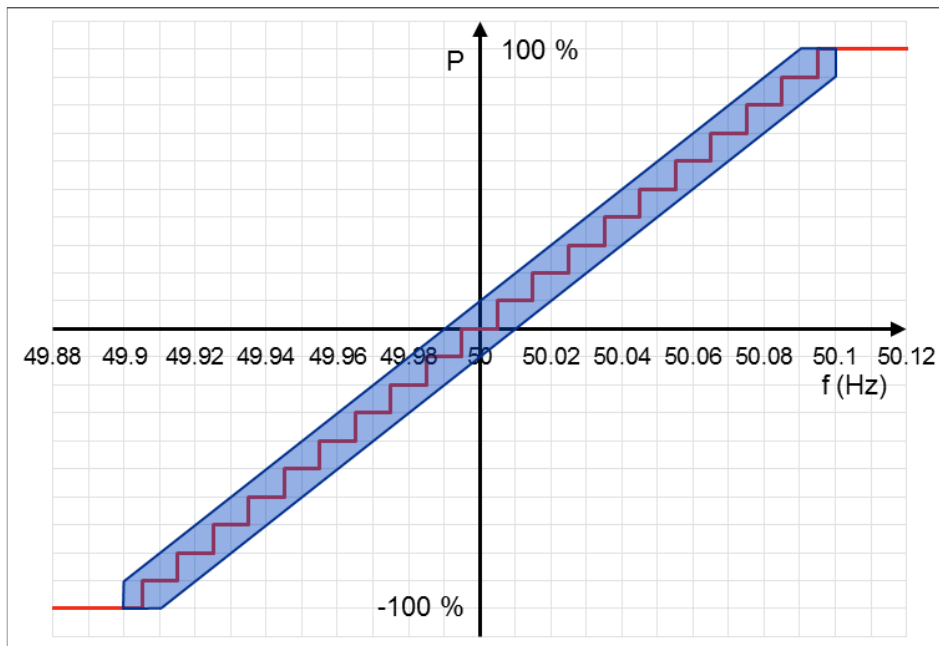
### 3.2 Taajuuden vakautusreservit

Taajuuden vakautusreservit ovat täysin automatisoituja pätötehoreservejä, jotka toimivat suoraan verkon taajuuden muutoksesta. Taajuuden vakautusreserveihin kuuluvat taajuusohjattu käyttöreservi ja taajuusohjattu häiriöreservi.

#### 3.2.1 FCR-N

Taajuusohjatut käyttöreservit eli FCR-N (frequency containment reserve for normal operation) ovat automaattisia pätötehoreservejä, jotka pyrkivät pitämään kantaverkon taajuuden 49,9-50,1 Hz. Tätä kyseistä taajuus aluetta kutsutaan normaaliksi taajuusalueeksi. Käyttöreservin säädön vähimmäisvaatimus on 0,1 MW kuorma. Säädön tulee myös aktivoitua kokonaan kolmessa minuutissa taajuuden poiketessa enemmän kuin 0,1 Hz verkon ominaistajuudesta eli 50 hertsistä.

Relekytketty taajuusohjatun käyttöreservin tulee säätää paloittain lineaarisesti kuvan 1 osoittamalla tavalla. Aktivoiminen tapahtuu sinisellä alueella, punainen käyrä kuvaa yhtä mahdollista ratkaisua. Kuvasta huomataan myös, että tuotantolaitoksen tulee pystyä lähes portaattomasti säätämään tuotantoa, josta saattaa aiheutua enemmän kustannuksia. (Fingrid, 2017)



Kuva 3.2. Relekytketyn resurssin aktivoituminen (Fingrid, 2017)

### 3.2.2 FCR-D

Taajuusohjatut häiriöreservit eli FCR-D (frequency containment reserve for disturbances) pyrkivät pitämään taajuuden vähintään 49,5Hz:ssä, sen laskiessa normaalilta taajuusalueelta. Taajuusohjatun häiriöreservin vaatimukset ovat, että sen täytyy aktivoida puolet kapasiteetistaan 5 sekunnissa ja koko kapasiteetin 30 sekunnissa. Säädön vähimmäiskoko häiriöreserveille on 1 MW. Oheisessa taulukossa on esitettyhäiriöreserville asetettuja vaatimuksia. Sen mukaan esimerkiksi taajuuden ollessa alle 49,6Hz on relekytketyn kuorman olla kokonaan irti kytkettynä kolmessa sekunnissa. Kuorman saa kytkeä takaisin verkkoon taajuuden ollessa vähintään 49,9Hz kolmen minuutin ajan. (Fingrid, 2017)

	Säädön vähimmäiskoko	Aktivoitumisaika	Muuta
Taajuusohjattu käyttöreservi	0,1 MW	3 min ± 0,1 Hz askelmaisella taajuusmuutoksella	Kuollut alue max ±0,05 Hz, statiikka max 6 %
Taajuusohjattu häiriöreservi, voimalaitosreservit	1 MW	5 s / 50 % 30 s / 100 %, kun taajuus 49,50 Hz	
Taajuusohjattu häiriöreservi, relekytetyt kuormat	1 MW	Välittömästi, kun taajuus 5 s < 49,7 Hz, 3 s < 49,6 Hz TAI 1 s < 49,5 Hz	Kuorman saa kytkeä takaisin verkkoon, kun taajuus vähintään 49,90 Hz kolme minuuttia

Taulukko 3.1. Taajuuden vakautusreservien vaatimukset. (Fingrid, 2016)

### 3.3 Taajuuden vakautusreservien hankinta ja markkinat

Taajuusohjatuille käyttö- ja häiriöreserveille on omat markkinapaikkansa, joista Fingrid hankkii vuosittain osan velvoitteistaan tarjouskilpailun perusteella. Tarjouskilpailu järjestetään syys-lokakuussa aina seuraavalle kalenterivuodelle. Kesken sopimuskauden ei ole mahdollista osallistua vuosimarkkinoille. Lisäksi Fingrid hankkii sähköä tuntimarkkinoilta kotimaasta ja ulkomailta. Tuntimarkkinoille voi osallistua kesken kalenterivuoden eikä se edellytä vuosimarkkinoille osallistumista. Yksittäisen kohteen tuottama reservimäärä tuntia kohden saa olla enintään 70 MW ja lisäksi häiriöreservin ylläpitoon aktivoituvan kuorman kokonaismäärä saa enintään 100 MW kullakin tunnilla. (Fingrid, 2017)

#### 3.3.1 Vuosimarkkinat

Vuosimarkkinoilla on kiinteä hinta ja kaikki osallistujat saavat saman korvauksen reservin ylläpidosta. Oheisessa kuvassa on viimevuosien markkinahinnat ja käytetyn kapasiteetin määrät. Reservihaltijan tulee myös toimittaa reservisuunnitelma seuraavan päivän käytettävissä olevasta kapasiteetista. Korvaukset maksetaan käytettävissä olevan kapasiteetin perusteella. Kuvasta huomataan, että häiriöreservien hinnan kehitys on ollut nousevassa trendissä 2010 luvulla ja niiden käytön enimmäismäärät ovat vaihdelleet tasaisesti. Käyttöreservien hinta kasvoi tasaisesti 2017 luvulle asti ja määrät pysyivät lähes vakioina 2016-2017 lukuun ottamatta.

	FCR-N hinta (€/MW,h)	FCR-N määrä (MW)	FCR-D hinta (€/MW,h)	FCR-D määrä (MW)
2011	9,97	71	1,48	244,3
2012	11,97	72,7	2,8	346,9
2013	14,36	73,5	3,36	299,8
2014	15,8	75,4	4,03	318,7
2015	16,21	73,6	4,13	297,5
2016	17,42	89	4,5	367
2017	13,00	55,0	4,7	455,7*

Taulukko 3.2. Sääto- ja häiriöreservien keskihinnat (Fingrid, 2016)

### 3.3.2 Tuntimarkkinat

Tuntimarkkinoilla hinta on yleensä korkeampi mutta käyttö vähäisempää ja epävarmempaa, sillä sitä käytetään vain täydentämään hankintaa. Tuntimarkkinoiden korvaus maksetaan kalleimman tilatun tarjouksen mukaan kullekin tunnille erikseen. Taajuusohjatulle häiriö- ja käyttöreserveille on myös erilliset markkinat. Esimerkiksi vuoden 2017 keskimääräinen käyttöreservin hinta ja kulutus on ollut 20,87 €/MW ja 34 MW. Samat arvot häiriöreserveille ovat 3,39 €/MW ja 5 MW.

### 3.4 Reservimarkkinoiden muuta vaatimukset

Vuosisopimuksen tehneen reservinhaltijan täytyy toimittaa seuraavan vuorokauden tunti-kohtainen reservisuunnitelma reservien määrästä. Suunnitelma voi olla enintään vuosisopimuksen suuruinen ja sen tulee olla 0,1 MW tarkkuudella. Suunnitelma lähetetään EDI-sanomana käyttäen DELFOR:ia ja se tulee toimittaa klo 18 mennessä. Tuntimarkkinoilla reservisuunnitelmaa ei tarvitse toimittaa.

Reservinhaltijan tulee myös ilmoittaa yksikkökohtaiset tiedot ylläpidettävästä taajuusohjasta käyttö- tai häiriöreservin määrästä. Tietojen tulee kuvata sen hetkistä reservin määrää ja sen todellista säätökykyä. Esimerkiksi taajuusohjatun käyttöreservin määrä voidaan laskea yhtälöstä 1. (Fingrid, 2017)

$$C_{FCR-N} = \max[\min(P_{max} - P_{asetusarvo}, P_{asetusarvo} - P_{min}, C_{säätoemäärä}), 0] \quad (1)$$

$P_{max}$  on voimalaitoskoneiston sen hetkinen maksimiteho

$P_{min}$  on voimalaitoskoneiston sen hetkinen minimiteho

$P_{asetusarvo}$  on voimalaitoskoneiston sen hetkinen tehon asetusarvo

$C_{säätkoemäärä}$  on säätökokein todettu reservimäärä

Vastaava yhtälö häiriöreserveistä voidaan laskea kaavalla 2.

$$C_{FCR-D} = \max[\min(P_{max} - P_{asetusarvo} - C_{FCR-N}, C_{säätkoemäärä}), 0] \quad (2)$$

Laskuihin on mahdollista tehdä tarvittavia muutoksia, että ne soveltuvat käytettävän reservimäärän laskentaan. Toisaalta reservinhaltija voi osoittaa säätöreservin jollain tarkemminkin laskelmilla. Laskelmamenetelmä tulee kuitenkin tällöin toimittaa Fingridille.

Fingrid voi myös pyytää reservinhaltijalta säätöön osallistuvien reservien yksikkökohtaiset pätehotiedot sekunnin tarkkuudella, jotta sopimuksen mukainen aktivoituminen voidaan todentaa. Tiedot tulee olla myös aikaleimattu suomen aikaan tai sisältää taajuusmittaustieto, joka on tahdissa suhteessa päteho mittaustietoihin. Mittaustiedot tulee säilyttää vähintään neljän vuorokauden ajan.

Laskutuksessa reservinhaltijan tulee toimittaa reservikohteiden seuraavat tiedot tuntiaikasarjoina: Yksikkökohtainen tuntikeskiteho, yksikkökohtainen tuntimaksimiteho sekä taajuusohjattujen käyttö- tai häiriöreservien määrä vuosisopimuksilla ja tuntimarkkinoilla. Tiedot toimitetaan EDI sanomina MSCONS sanamuotoa käyttäen viimeistään 10 päivän kuluttua toimituksesta.

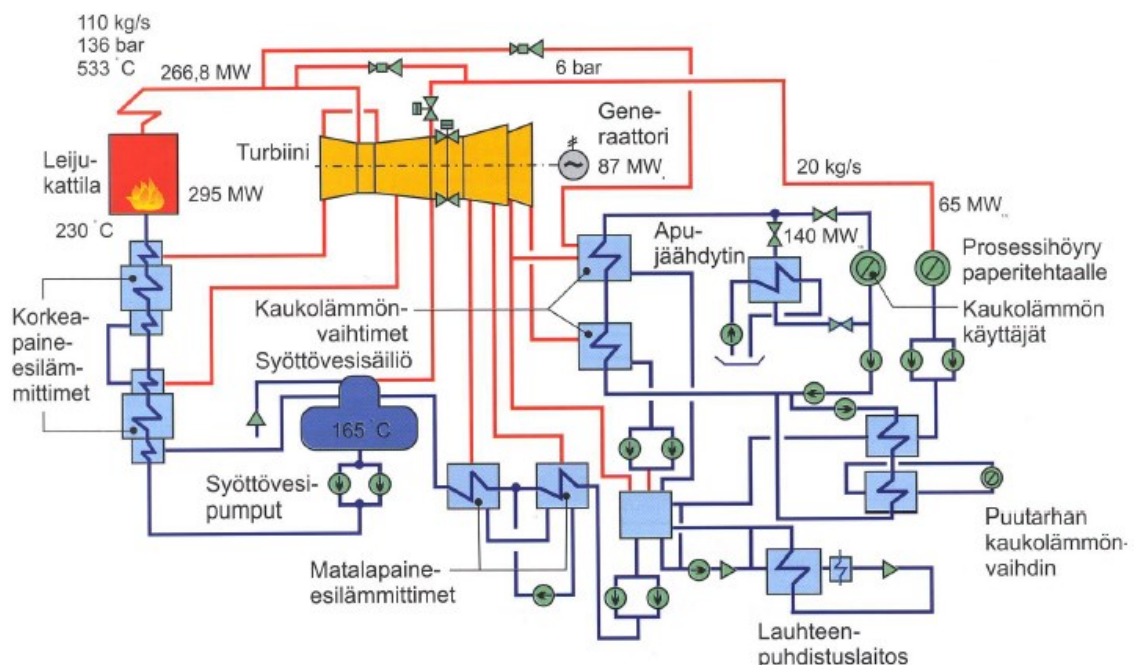
Fingrid voi myös pyytää reservinhaltijalta kuvaukset reservikohteiden teknisistä ominaisuuksista. Kuvausten tulee sisältää generaattorin ja turbiinin yleiset tiedot ml. hitausvakiot, vesitiet ja vesiaikavakiot. Lisäksi kuvaus taajuudensäädön toiminnasta sekä kyseisestä taajuudenmittauksesta. Myös kuvaus turbiininsäätäjän toiminnasta ja taajuudensäädön toimintaan vaikuttavista asioista. Mikäli tietojen toimittaminen aiheuttaisi kohtuuttomia kustannuksia on osa niistä neuvoteltavissa ja sovittavissa mitkä ovat ne oleellimmat. (Fingrid, 2017)

#### 4. CHP-LAITOS RESERVIMARKKINOILLA

CHP-laitoksen ollessa reservimarkkinoilla sitä ei voi enää ajaa pelkän lämmöntarpeen ehdoilla, vaan myös sähköntuotannon säätelyn. Uudessa ajotavassa on siis otettava monta asiaa huomioon. Silti kaukolämmön kulutus ja sähkön kulutus voidaan joltain osin ennustaa, mutta kyseiset kulutushuiput eivät ajoitu samaan ajankohtaa tai ole toisistaan riippuvaisia. Myös sähköverkon taajuuden käyttö- tai häiriöreservien käyttäytymistä on haastava ennakoida etukäteen. Reservimarkkinoiden tarpeiden mukaisessa ajotavassa voi syntyä tilanteita jolloin kaukolämmöntuotanto ylittää sen kysynnän. Tällöin tulisi myös huomioida sen varastointimahdollisuudet kuten terässäiliö tai itse verkko.

##### 4.1 Sähköntuotannon säätely

CHP-laitoksissa rakennussuhde kertoo sähkön ja kaukolämmön tuotantosuhteen. Isoissa laitoissa se voi normaalisti olla jopa 0,5, mikä tarkoittaa että esimerkiksi sähköä tuotetaan 30% ja kaukolämpöä 60%. Normaalisti sähköntuotantoa on pystytty lisäämään nostamalla tuorehöyryn lämpötilaa ja painetta tai syöttöveden turbiinien väliottohöyryllä tapahtuvalla monivaiheisella esilämmityksellä (Huhtinen, 2000).



Kuva 4.1. Fortum rauhalahden voimalaitoksen prosessikaavio. (Repo, 2009)

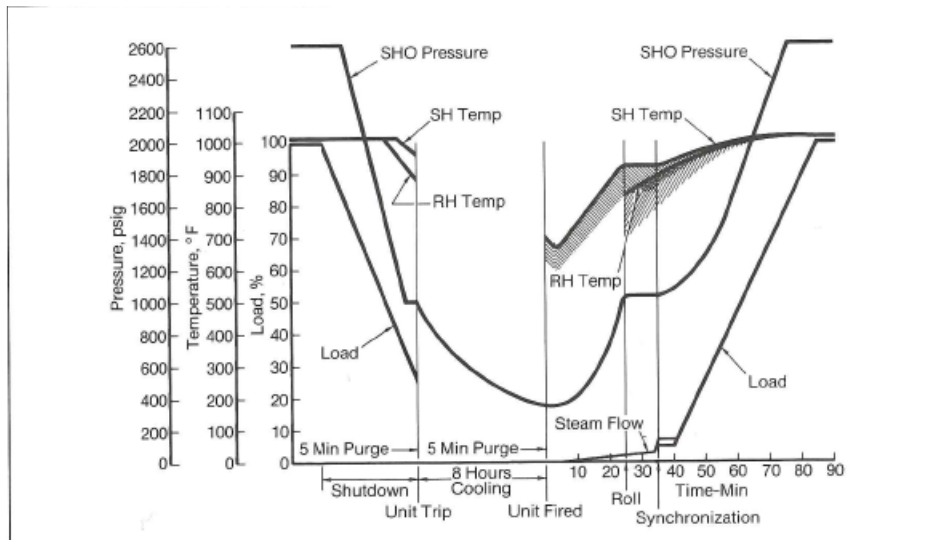


Kuvassa 4.1 on Fortumin Rauhanlahden voimalaitoksen prosessikaavio. Prosessikaaviota tarkastelemalla huomaa, että teoriassa sähkön tuotantoa on mahdollista säädellä kuvassa olevilla venttiileillä ja kattilan kuorman avulla.

CHP-laitoksella on mahdollista säätää sähköntuotantoa muutamilla eri tekniikoilla. Yleisesti sähkön- ja lämmöntuotantoa pystytään säätämään kuorman mukaan. Pelkästään kuorman mukaan tuotantoa säädettäessä, tulee reservimarkkinoiden säädön aikavaatimukset vastaan. Etenkin vanhoissa laitoksissa missä hiili tai metsäenergia toimii polttoaineena. Niinpä säätö tulisi toteuttaa osana kaukolämmön tuotannon muutoksilla, sekä kuorman muutoksilla. Prosessikaaviota tarkastellessa huomaa, että kyseinen säätö olisi teoriassa mahdollinen rauhanlahden voimalaitoksessakin.

Muun muassa Wärtsilä on rakentamassa Saksaan CHP-laitosta, joka tuottaa noin 100 MW sähköä ja 96 MW lämpöä. Laitoksessa on 10 kaasumoottoria ja se pystytään käynnistämään ja sammuttamaan kahdessa minuutissa. Kyseinen laitos on nimenomaan suunniteltu joustavaan sähköntuotantoon. Tästä huomataankin, että uusilla CHP-laitoksilla on jo huomattavasti paremmat mahdollisuudet säädön toteuttamiseen vanhoihin verrattuna. (Wärtsilä, 2016)

Oheisessa kuvassa 4.2 on myös esitetty kattilan alasajon ja ylösajon taulukko 8 tunnin seisokin jälkeen. Kuvasta huomataan, että laitosten uudelleen käynnistymisajat ovat melko pitkät ja vielä paljon pidemmät mikäli kattila on täysin jäähtynyt, koska sen esilämmittäminen vie aikaa. Kuvasta saa myös osviitan laitoksen kuorman säädön muutoksille ja sen hitauteen reagoida näihin muutoksiin. Kuva osoittaa etenkin vanhantyyppisten laitosten hitauden reagoida muutoksiin.



Kuva 4.2 kattilan alasajo ja käynnistyksen kuvaaja 8 tunnin jäähtymisellä. (Singer, 1981)

#### 4.1.1 Säätelyn toteutustavat

CHP-laitoksissa sähkön säätelylle on muutama eri toteutustapa:

1. kokonaistuotannon muutos, jossa kasvatetaan tai vähennetään sähkön ja lämmön tuotantoa. Voidaan toteuttaa muun muassa kuorman muutoksella
2. sähkötehon nostaminen ohitusventtiiliä käyttämällä, jossa normaalitilanteessa osa höyrystä ajetaan suoraan ohitusventtiiliin kautta turbiinin ohi
3. sähkötehon laskeminen ohitusventtiilin avaamisella, jossa osa höyrystä ajetaan suoraan kaukolämmöksi sähköntuotannon pienentämiseksi nopeasti

CHP-laitoksissa sähkön säätelyä on mahdollista ja sitä pystytään esimerkiksi pudottamaan haluttu määrä. Tämä toteutetaan ohitusventtiilillä, milloin laitos tuottaa kaukolämpöä sen verran enemmän mitä sähkötehoa on vähennetty. Ylimääräinen kaukolämpö varastoidaan joko verkkoon tai erilliseen varastoon. Tämä toimii osittain lyhyen aikaa, mutta kysynnän laskiessa myös laitoksen kuormaakin on vähennettävä, ettei kate ajaudu liian pieneksi. Sähköntuotannon lisääminen on hankalampaa, varsinkin jos kuormaa on pienennetty merkittävästi. Tämä rajaa CHP-laitoksissa sähkönsäätelyä siten että sähköntuotantopotentialista alle puolet ovat säätelyyn soveltuva. Tämäkin tulee selvittää laitoskohtaisesti, joko säätökokeiden tai yhtälöiden 1 ja 2 avulla. (Vakkilainen, 2018)

Kaukolämmön kulutus ja sähkön kulutus voidaan joltain osin ennustaa, mutta kyseiset kulutushuiput eivät ajoitu samaan ajankohtaa tai ole toisistaan riippuvaisia. Kaukolämmön varastoinnin avulla pystytään esimerkiksi vastapainelaitoksessa tuottamaan sähköä sekä kaukolämpöä enemmän, koska lisääntynyt kaukolämpö ohjataan erilliseen varastoon, josta se voidaan myöhemmin käyttää kaukolämmön huippukulutuksen aikana. Tällöin kaukolämmöstä saadaan luonnollisesti parempi hinta. Kaukolämpö varastona toimii pääsääntöisesti terässäiliö, joita on Suomessa käytössä jo useita kymmeniä. (Vakkilainen, 2018)

## **4.2 Tuotannon kannattavuus**

Kannattavuutta on erittäin hankala yleisesti määrittää tarkasti, koska kokonaiskulut ja investoinnit reservimarkkinoiden vaatimuksiin ovat laitoskohtaisia. Mutta säätömarkkinoilla saatava ylläpitokorvaus perustuu käytettävissä olevaan tehoon, sopimuksen hintaan ja pysyvyyteen markkinoilla. Tuntimarkkinoita tarkasteltaessa hintaa ei voi täysin tarkasti sanoa, koska se määräytyy joka tunnille erikseen korkeimman hyväksytyyn tarjouksen perusteella. Hyvän arvion saa edellisen vuoden keskihinnasta.

Kannattavuutta tutkiessa yksi ongelma on myös CHP-laitosten alhainen käyttöaste. Etenkin vertailtaessa vesivoimaan, jolla on ennen turvattu Suomen säätövoima. Vesivoimalla tämän on yli 90%, CHP-laitokset yltyvät vain noin 50% tuntumaan. Tämä rajaa ainakin osallistumista vuosimarkkinoille, sillä siellä pysyvyyden tulisi olla korkea. CHP-laitosta ei ole taas kannattava ajaa kesällä suurilla kuormilla, sillä kaukolämmön kysyntä on hyvin alhaista.

### **4.2.1 CHP-laitoksen teoreettinen osallistuminen säätömarkkinoille**

Aiheesta on myös tehty teoreettinen laskelma kannattavuus aspekteista ottaen huomioon vain markkinoilla toimiessaan saatava mahdollinen lisätuotto. Data perustuu 2013 ja 2014 vuoden markkinahintoihin ja mallinnuksessa koko sähköntuotanto osallistui reservimarkkinoille. Lisäksi mallinnettava laitos oli teholtaan 20 MW ja maksimi sähköntuotanto oli 6 MW. Lisäksi pienin kattilan kuorma on 60% kun sähköä tuotetaan ja 30% kun tuotetaan

pelkästään lämpöä. Tutkimuksessa sähkönsäätely tapahtui ohitusventtiilillä. Normaalitilanteessa ohitusventtiili on puoliksi auki, jolloin sähköntuotantoa pystytään vähentämään ja lisäämään verkon tarpeen mukaan.

	2013		2014	
	Reserve market	Without reserve market	Reserve market	Without reserve market
Revenue, total	4 127 000 €	3 994 000 €	3 797 000 €	3 694 000 €
Heat	3 230 000 €	3 230 000 €	3 230 000 €	3 230 000 €
Elsot	595 000 €	764 000 €	362 000 €	464 000 €
FCR-N	233 000 €	0 €	153 000 €	0 €
FCR-D	69 000 €	0 €	52 000 €	0 €
Costs, total	3 019 000 €	3 096 000 €	2 845 000 €	2 904 000 €
Fuel consumption	3 019 000 €	3 096 000 €	2 845 000 €	2 904 000 €
Profit	1 108 000 €	898 000 €	952 000 €	790 000 €

Kuva 4.3 kulut ja tuotot markkinoille osallistumisesta. (Haakana, 2016)

Tutkimuksessa reservimarkkinoille osallistuminen toi 20% lisätuoton yhtiölle. Reservimarkkinoilla toimiminen tosin hieman poikkeaa tämän tutkimuksen teoreettisesta ajotavasta, mutta osoittaa kuitenkin reservimarkkinoiden mahdollisen potentiaalin tuottojen näkökulmasta. (Haakana, 2016)

### 4.3 CHP-laitoksen kyky toimia reservimarkkinoilla

Kuten aiemmin on tullut esille, reservimarkkinat houkuttelevat sähköntuottajia mahdollisten lisätuottojen toivossa. CHP-laitoksia ei kuitenkaan kyseisillä markkinoilla juurikaan ole, vaan reservimarkkinat on toteutettu lähinnä vesivoimalla, kaasuturbiineilla ja irtikytkettävillä kuormilla. Tämä ei kuitenkaan täysin tarkoita sitä, etteikö CHP-laitokset voisi toimia reservimarkkinoilla. Etenkin uusilla laitoksilla olisi paremmat valmiudet toimia säätövoimana, koska nykyisillä turbiineilla on siihen valmiudet ja uusiin laitoksiin olisi helpompi asentaa tarvittavat säätövalmiudet. Tämäkin on tietysti täysin laitoskohtaista.

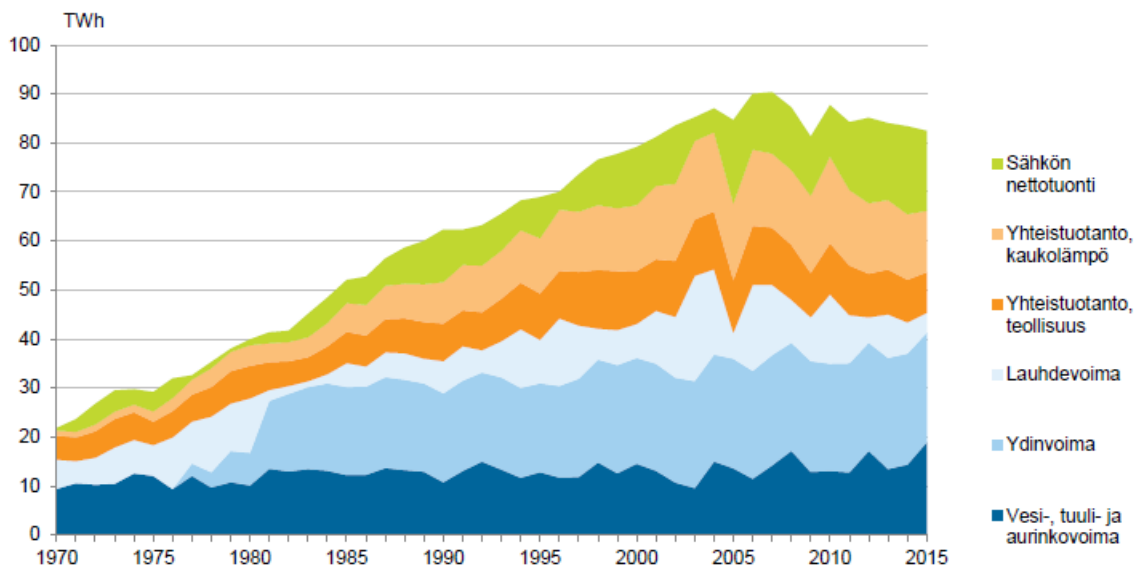
CHP-laitokset soveltuvat paremmin tuntimarkkinoille, koska pidemmän aikavälin säädössä kaukolämmön epäsäännöllinen tuotanto alkaa vaikuttamaan verkostoon ilman varastoja. Tämä johtuu siitä, että sähköntuotannon säätö vaikuttaa suoraan kaukolämmön tuotantoon lyhyellä aikavälillä. Sekä CHP-laitosten huipunkäyttöaika on tyypillisesti alle 5000 h/a,

mikä vaikuttaa myös vuosimarkkinoilla maksettavaan korvaukseen. Siksi CHP-laitos ei ole kovinkaan soveltuva säätösähkön vuosimarkkinoille. Myös häiriöreservin vaatimustaso on erittäin haastava CHP-laitoksille, joten näen parempana vaihtoehtona taajuusohjatunkäyttöreservin.

## 5. CHP-LAITOSTEN KOKONAISPOTENTIALIAALI SUOMESSA

CHP-laitokset voivat olla kokoluokaltaan Topinojan 0,8MW laitoksesta jopa Vuosaaren 485MW laitokseen. Laitokset eroavat tekniikoiltaan huomattavasti, mutta pääpiirteittäin molemmat tuottavat sähköä sekä lämpöä. CHP-laitosten yksi erittäin hyvistä puolista onkin, että se on erittäin monikäyttöinen kokonaisuus, sillä niiden polttoaineina voidaan käyttää uusiutuvaa energiaa tai kaasua. Sekä niitä voidaan rakentaa suurien teollisuus kompleksien yhteyteen, kuin myös pienempinä laitoksina kaupunkien läheisyyteen. Suomesta CHP-laitoksia löytyy jokaisesta maakunnasta, joten niiden tuottaman sähkön siirtomatkatkaan eivät ole pitkiä. (Energiavirasto, 2018) Tämä sopii etenkin tulevaisuuden verkkoratkaisuille, joista pyritään jatkuvasti kehittämään älykkäämpiä ja kompaktimpia. Lyhyet siirtomatkat pienentävät häviöitä sekä leikkaavat kuluja. Uusiutuvaan energian lisääntyessä toimintavarmuus on silti taattava ja CHP-laitoksilla tulee tässä olemaan merkittävä rooli myös tulevaisuudessa.

### 5.1 Sähköntuotannon osuus



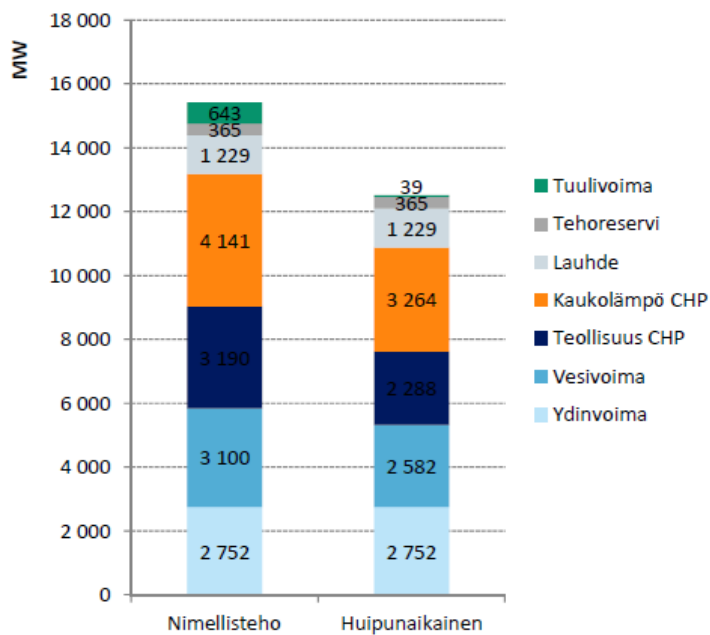
Kuva 5.1 Sähköntuotannon osuudet voimalaitosyksiköittäin. (Tilastokeskus, 2016)

CHP-laitoksia on ympärisuomea ja ne ovat merkittävä osa suomalaista kaukolämpöverkosta. Kaukolämmöstä kolme neljäsosaa tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotannoilla. Muutenkin yhteistuotannolla on merkittävä osuus suomen sähköntuotantoon. Sillä tuotetaan kolmasosa suomen sähköntuotannosta. Kuvasta 5.1 huomataan myös, että yhteistuotannolla

tuotettu sähkö on jo laskussa verrattuna aikaisempiin vuosiin. Tähän osasyynä ovat laitosten veropolitiikka ja uusiutuvien energianlähteille kuten tuuli- ja aurinkovoimalle maksettavat tariffit.

## 5.2 Nimellinen tuotantoteho

CHP-laitoksia ajetaan normaalisti kaukolämmöntuotannon tai teollisuuden höyryntarpeen mukaan. Sähköntuotanto on pääsääntöisesti tullut sivutuotteena ja mahdollisena lisätulona, sekä kokonaishyötysuhteen parantajana. Laitosten sähköntuotantokyky on yleensä suurempi kuin normaalissa ajossa.



Kuva 5.2 Sähköntuotanto nimellistehoina ja huippukulutuksen aikana. (Pöyry, 2015)

Taulukosta huomataan, kuinka alhainen sähköntuotanto CHP-laitoksilla on huippukulutuksen aikana nimellistehoon verrattuna. Tämä johtuu siitä, että kyseinen ajankohta sijoittuu talven kylmimpään jaksoon, jolloin luonnollisesti lämmönkulutus on myös korkeimmillaan. Huipunaikainen kulutus ajoittuu kylmään talvipäivään, jolloin on -25 astetta pakkasta.

### **5.3 Mahdollinen säätövoima**

CHP-laitosten nimellisteho vuonna 2014 sähköntuotannossa on noin 7200 MW. Jos oletetaan, että tästä kapasiteetista olisi 5% mahdollista säätää tarvittaessa kulutuksen tai häiriön sattuessa, se tarkoittaisi jo 360 MW säätötehoa. Tämä teho on esimerkiksi suurempi kuin koko suomen vuosisopimukselliset häiriöreservit. Tämä esimerkki osoittaa kuinka paljon suomessa on CHP-laitoksia ja kuinka paljon niillä olisi mahdollista potentiaalia hyödyntää tulevaisuudessa osana säätömarkkinoita.



## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Säätösähkömarkkinoille on tiukat kriteerit mittausten ja säätölaitteiden kannalta, joten niiden täyttäminen vaatii laitokselta paljon ponnisteluja. Huomioon otettavia seikkoja ovat muun muassa kaukolämmön määrän muutokset sähkön säätelyssä ja itse säädön toteutus. CHP-laitos kattaa monenlaisia ja eri polttoaineilla toimivia sähkön ja lämmön tuotantolaitoksia, joten selkeää yhtä oikeaa ratkaisua on mahdoton sanoa. Kirjallisuuden ja haastattelun pohjalta potentiaalisimmaksi rajausten puitteissa osoittautuisi taajuusohjatun käyttöreservien tuntimarkkinat. Tutkimuksen mukaan CHP-laitos kykenee lyhytaikaiseen säätöön paremmin, sillä itse kaukolämpöverkkoakin voi käyttää lyhytaikaisena varastona, joten tuotannon muutosta ennakoitessa tämä voidaan ottaa huomioon. Reservimarkkinoilta saa myös paremman hinnan sähköstä normaaliin elspot hintaan verrattuna. Suomen sähköntuotannosta kolmasosa tulee CHP-laitoksista, joten tulevaisuuden kannalta niillä voisi olla suuri potentiaali säätövoimaksi. Etenkin kun uusiutuvat energiantuotantomuodot lisääntyvät yhä enemmän markkinoilla.

## LÄHDELUETTELO

Energiavirasto. 2018.[viitattu 10.1.2018] Saatavilla: <https://www.energiavirasto.fi/voimalaitosrekisteri>

Fingrid. 2017. Taajuusohjattujen reservien ylläpidon sovellusohje. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.2.2017] saatavilla: <http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Ajankohtaisten%20liitteet/2016/Tarjouspyynt%C3%B6%20vuodelle%202017/Liite2%20-%20Taajuusohjattujen%20reservien%20yll%C3%A4pidon%20sovellusohje%202017.pdf>

Fingrid. 2017. Reservilajit. [verkkosivu]. [viitattu 24.2.2017] saatavilla: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Sivut/default.aspx>

Fingrid. 2016. Taajuusohjattu käyttö ja häiriöreservi. [viitattu 20.2.2017] Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-haarioreservi/#tekniset-vaatimukset>

Gan C. Abdulraheem B. 2016. Power System Frequency Stability and Control: Survey. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.10.2018] Saatavilla : <https://pdfs.semanticscholar.org/d0ac/50f3f73ac4ee5309984dbf6a044d7511a787.pdf>

Haakana J. Tikka V. Lassila J. Partanen J. 2016. Opportunities of bioenergy-based CHP production in balancing renewable power production. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.2.2017] saatavilla: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7521341/?reload=true>

Haastattelu, Vakkilainen E. Energiatekniikan professori. 8.1.2018, Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Huhtinen M. Kettunen A. Nurminen P. Pakkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka. S. 7-15.

IEA. 2008. Reduction of residential carbon dioxide emissions through the use of small cogeneration fuel cell systems.[viitattu 19.2.2017] Saatavilla: <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/reduction-residential-carbon-dioxide-emissions-through-use-small-cogeneration-fuel-ce-6>

Ikkala T. 2015. Kaukolämpöakku. [viitattu 10.1.2018] saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/2015-03-24/20-000-kuution-veis%C3%A4ili%C3%B6st%C3%A4-tulee-Suomen-suurin-kaukol%C3%A4mp%C3%B6akku---varastoi-800-MWh-3259630.html>

Koskelainen L. Saarela R. Sipilä K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus. Kirjapaino Libris Oy, Helsinki.

KyAmk. Vastapainevoimalan periaatekaavio. [viitattu 27.2.2017] Saatavilla: [http://www.knowenergy.net/suomi/monipoltt\\_kattilat/5\\_0\\_hoyrykatt\\_periaate/vastapainevoimala.htm](http://www.knowenergy.net/suomi/monipoltt_kattilat/5_0_hoyrykatt_periaate/vastapainevoimala.htm)

Repo S. 2009. Sähkötekniikan perusteet k.[viitattu 16.2.2017] Saatavilla: <https://docplayer.fi/1155292-Sahkotekniikan-perusteet-k-tampere-tampereen-teknillinen-yliopisto-2009-s-opetusmoniste-tampereen-teknillinen-yliopisto-sahkoenergiatekniikka.html>

Pöyry. 2015. Suomen sähkötehon riittävyys ja kapasiteettirakenteen kehitys vuoteen 2030. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.1.2018] Saatavilla: [https://tem.fi/documents/1410877/2717655/Suomen\\_sahkotehon\\_riittavyys\\_ja\\_kapasiteettirakenteen\\_kehitys\\_vuoteen\\_2030\\_2015.pdf/56b3f402-31fa-48a7-a6ef-d750e4665f78](https://tem.fi/documents/1410877/2717655/Suomen_sahkotehon_riittavyys_ja_kapasiteettirakenteen_kehitys_vuoteen_2030_2015.pdf/56b3f402-31fa-48a7-a6ef-d750e4665f78)

Singer. Joseph G. 1981. Combustion: Fossil power systems. S. 7-42.

Tilastokeskus. 2016. Energiatilastot 2016. [viitattu 14.2.2017] Saatavilla: [http://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2016/data/kalvo1\\_s.pdf](http://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2016/data/kalvo1_s.pdf)

Wärtsilä. 2016. [viitattu 17.1.2018] saatavilla: <https://www.wartsila.com/fi/media-fi/uutinen/19-12-2016-wartsila-toimittaa-saksaan-100-megawatin-joustavan-lammon-ja-sahkon-yhteistuotantolaitoksen>