

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma  
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Matti Karhinen

HAJAUTETUN ENERGIATUOTANNON HYÖDYNTÄMISEN  
MAHDOLLISUUDET SÄHKÖNJAKELUN  
TOIMITUSVARMUUDESSA

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2017  
KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Kesäkuu 2017**  
**Ympäristötekniikan koulutusohjelma**

Tikkarinne 9  
80220 JOENSUU  
013 260 600

**Tekijä**

Matti Karhinen

**Nimeke**

Hajautetun energiatuotannon hyödyntämisen mahdollisuudet sähköjakelun toimitusvarmuudessa

**Toimeksiantaja**

PKS Sähkösiirto Oy

**Tiivistelmä**

Tässä opinnäytetyössä on tutkittu hajautetun energiatuotannon hyödyntämisen mahdollisuuksia sähköjakelun toimitusvarmuuden näkökulmasta. Työn lähtökohtana oli se, kuinka pystytään yhdistämään lisääntyvä pienimuotoinen hajautettu sähköntuotanto sekä lisääntyneet vaatimukset sähköjakelun toimitusvarmuuden parantamiseksi.

Käytetyt tutkimusmenetelmät perustuivat kirjalliseen lähdemateriaaliin. Tutkimus antaa vastauksia siihen, millaisia haasteita hajautetusta sähköntuotannosta on odotettavissa, kun se yleistyy. Sähköjakeluverkon tekninen käyttöikä on pitkä, joten tutkimus antaa myös tietoa siitä, miten jakeluverkkoa tulisi kehittää, että se olisi teknillisiltä ominaisuuksiltaan käytettävissä vielä käyttökänsä loppupäässä. Työssä on myös esitelty hajautetun sähköntuotannon vaikutukset jakeluverkon suojaukseen ja verkonsuunnitteluun. Tuloksena on suunnitelma voimalaitoksen liittämistä jakeluverkkoon.

**Kieli**

suomi

Sivuja 86

Liitteet 0

**Asiasanat**

hajautettu sähköntuotanto, sähköjakelun toimitusvarmuus, sähköjakelu



**THESIS**  
**June 2017**  
**Degree Programme in Renewable Energy**  
**Master's Thesis**  
Tikkarinne 9  
80220 JOENSUU  
FINLAND  
+358 13 260 6900

Author

Matti Karhinen

Title

Possibilities of Utilizing Decentralized Energy Production from the point of view of Supply Security in Electricity Distribution

Commissioned by

PKS Sähkösiirto Oy

Abstract

This thesis explores the possibilities of utilizing decentralized energy production from the point of view of the supply security of electricity distribution. The starting point of this thesis work was how to combine the increasing small-scale decentralised generation of electricity and increased requirements to improve the reliability of electricity distribution.

The research methods used in the thesis were based on written publications.

The study provides answers to the challenges of decentralized power generation when it becomes more common. The technical lifecycle of an electricity distribution network is long and the study also provides information on how the distribution network should be developed so that it is technically available even at the end of its lifespan. The work also presents the effects of decentralized power generation on distribution network protection and network planning. The result is a plan to connect the power plant to the distribution network.

Language

Finnish

Pages 86

Appendices 0

Keywords

decentralized energy production, security of electricity distribution, electricity distribution

## Sisältö

1. Johdanto .....	7
1.1 Tausta ja lähtökohdat.....	7
1.2 Tavoitteet ja rajaukset.....	9
1.3 Kehittämistyön lähestymistapa ja menetelmälliset valinnat.....	9
1.3.1 Tapaustutkimus kehittämistyön lähestymistapana .....	9
1.3.2 Dokumenttianalyysi tiedonkeruumenetelmänä.....	10
1.3.3 Aineiston hankinnan keinot ja analysointi .....	11
1.4 Opinnäytetyön rakenne.....	12
2. Hajautettu energiantuotanto.....	13
2.1 Hajautetun energiantuotannon teknologiat .....	15
2.2 Aurinkosähkö .....	15
2.3 Tuulivoima.....	19
2.4 Biopolttoainetta käyttävät CHP –voimalaitokset.....	25
2.5 Pien- ja minivesivoimalaitokset .....	35
3. Sähkön siirto ja sähkömarkkinat .....	41
3.1 Sähköverkkotoiminta.....	42
3.2 Microgrid .....	46
3.3 Sähkömarkkinat .....	47
4. Lainsäädäntö pienimuotoisesta sähköntuotannosta .....	50
4.1 Tarvittavat luvat.....	51
4.2 Tuet.....	51
4.3 Verotus .....	53
4.4 Sähköverkkoon liittyminen .....	53
4.5 Sähkönmyynti .....	56
5. Hajautetun tuotannon vaikutukset sähkönjakeluverkossa.....	58
5.1 Yleistä .....	58
5.2 Tuotantolaitoksien luokittelu.....	60
5.3 Saarekekäytön esto .....	61
5.4 Saarekekäyttö.....	64
5.5 Hajautetun tuotannon vaikutukset sähköverkkoon.....	66

5.5.1	Vaikutukset keskijänniteverkon suojaukseen .....	67
5.5.2	Relesuojaus .....	67
5.5.3	Muutos tarpeet relesuojaukseen .....	69
5.5.4	Vaikutukset verkon jännitteeseen .....	73
6.	Tulokset ja johtopäätökset .....	76
7.	Pohdinta.....	80
8.	Lähteet.....	82

## Lyhenteet

CHP	Combined Heat and Power yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto.
HAT	Hot Air Turbine kuumailmaturbiini
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine vaaka-akselinen tuulivoimala
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model sääennustemalli
IEC	International Electrotechnical Commission kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IoT	Internet of Things esineiden internet
kV	kilovoltti
kVA	kilovolttiampeeri
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
LoM	Loss-of-Mains saarekekäytön esto
MW	Megawatti
NDZ	Non Detection Zone suojausalueen ulkopuolella
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine pystyakselinen tuulivoimala
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
Si	Piin kemiallinen merkki

## 1. Johdanto

Suomi, kuten muutkin EU-maat ovat sitoutuneet EU:n energiapolitiikkaan, jonka peruslähtökohdat ovat kestävyys, kilpailukyky ja toimitusvarmuus. Myös Suomen kansalliset tavoitteet ovat yhteneväiset näiden kanssa. Lisäksi yksi Suomen hallituksemme kärkihankkeista on *Hiilettömään, puhtaaseen ja uusiutuvaan energiaan kustannustehokkaasti*. Yksi tämän hankkeen tavoite on, että päästöttömän uusiutuvan energian käyttöä lisätään kestävästi niin, että sen osuus nousee yli 50 prosenttiin 2020-luvulla. Tulevaisuuden tavoitteena on, että Suomen energiajärjestelmä muuttuu hiilineutraaliksi ja sen perustana on uusiutuvat energialähteet. (TEM 2017, 34.)

Nykypäivänä myös häiriöttömän sähköenergian saanti ja erityisesti kestävällä tavalla tuottaminen on nyt ja erityisesti tulevaisuudessa Suomessa ja muuallakin teollisen ja yksityisen toiminnan perusta. Lisäksi sähkömarkkinalaki vuodelta 2013 määrittää jakeluverkonhaltijoille toiminnan laatuvaatimukset, joissa määritellään esimerkiksi se, ettei jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena saa aiheuttaa asemakaava-alueella yli 6 tunnin sähkönjakelun keskeytystä ja haja-asutusalueella yli 36 tunnin sähkönjakelun keskeytystä. (Finlex 2010.)

### 1.1 Tausta ja lähtökohdat

Tulevaisuudessa huomattava osa sähkönjakelussa käytettävistä avojohdoista on uusittava ikääntymisen tai kiristyneiden sähkön toimitusvarmuus kriteereiden vuoksi. Tämä on samaan aikaan iso haaste mutta myös mahdollisuus. Sähkön jakeluverkkojen jälleenhankinta-arvo on yli 12 miljardia euroa, verkkojen käyt-

töikä on pitkä avojohdoilla noin 50 vuotta ja maakaapelilla jopa 100 vuotta. Nykyinen sähköjakeluverkko on suunniteltu siten, että sähköntuotanto on keskitettyä. Tässä mallissa on energiaa toimitettu pääsääntöisesti kuluttajalle päin, ei kuluttajalta pois päin. Tulevaisuudessa sähköverkossa tulee toimimaan erilaisilla tekniikoilla toimivia sähkön pientuottajia, pientuottajista koostuvia virtuaalisia voimaloita sekä energiavarastoja. Tällöin energian suunta ja hallinta tulevat olemaan monimutkaisempia kuin nykyisin. Pientuotannon lisääntyminen vaikuttaa pienentävästi sähköenergian siirtomääriin sekä sähkönsiirrosta saataviin tuloihin. Tästä seuraa miljardien arvoinen kysymys, millainen tulisi olla tulevaisuuden sähköjakeluverkko, sillä nyt suunniteltavat ja rakennettavat verkot palvelevat meitä vielä tämän vuosisadan lopussa. (Lakervi & Partanen 2008, 9.)

Lisääntyvä hajautettu pienimuotoinen sähköntuotanto tuo tullessaan tarvetta tiiviimmälle yhteistyölle kuluttajien, kaupallisten toimijoiden, sähkön jakeluverkonhaltioiden sekä viranomaisten kesken energia-alalla. Haasteina tulee olemaan energiataseen hallinta, mahdolliset sähkönlaatuongelmat ja tasapuolinen ja syrjimätön kohtelu kaikille osapuolille. Näiden lisäksi myös jakeluverkon toimitusvarmuudelle asetetaan uusia vaatimuksia sähkön pientuotannon lisääntyessä.

Jotta hajautettu sähköntuotanto tukisi sähköjakelun toimitusvarmuutta, tulisi sähköverkon ja voimalaitosten suunnittelussa ja rakentamisessa huomioida se, että niiden toiminta ei saa häiriintyä kummankaan vikatilanteessa. Seuraavassa esimerkki ongelmasta:

Sähköjakeluverkkoon on kytketty sähköntuotantoyksikkö ja laitoksen käyttö estyy kymmenien kilometrien päässä sähkölinjalle kaatuvan puun takia. Vian paikallistamiseen ja korjaamiseen menee aikaa neljä tuntia. Sähköntuottaja menettää neljän tunnin tuotannon sekä hänelle koituvat myös laitoksen uudelleen käynnistämisestä aiheutuvat kustannukset.



## **1.2 Tavoitteet ja rajaukset**

Tässä tutkimusprojektissa käsitellään sitä, mitä teknisiä asioita täytyy huomioida voimalaitosta, sähköjakeluverkkoa ja suojausta suunniteltaessa, jotta voimalaitoksia pystyttäisiin käyttämään saarekekäytössä. Saarekekäytöllä tarkoitetaan tässä työssä sitä, että tuotantoyksikkö kykenee itsenäisesti huolehtimaan pääverkosta eroon kytketyn aliverkon sähkönsaannista.

Työn tavoite on tutkia sitä, onko mahdollista hyödyntää hajautettua sähköntuotantoa saarekekäytössä ja näin parantaa sähkön jakeluverkon toimitusvarmuutta. Työ toteutetaan sähkön jakeluverkonhaltijan näkökulmasta. Tässä työssä ei laskea tai vertailla sähkön- tai lämmöntuotannon kustannuksia tai kannattavuuksia.

## **1.3 Kehittämistyön lähestymistapa ja menetelmälliset valinnat**

### **1.3.1 Tapaustutkimus kehittämistyön lähestymistapana**

Tapaustutkimus soveltuu kehittämistyön lähestymistavaksi, kun halutaan syvällisesti ymmärtää kehittämisen kohdetta ja tuottaa kehittämisehdotuksia. Tutkimuksen kohde voi olla esimerkiksi yritys tai sen osa, yrityksen tuote, palvelu, toiminta tai prosessi. Tapaustutkimuksessa tutkimuksen kohteita on vähän, usein yksi. Tapaustutkimus tuottaa tietoa nykyajassa tapahtuvasta ilmiöstä sen todellisessa tilanteessa ja toimintaympäristössä. Tutkimuksen kohde valitaan työelämän kehittämistyössä käytännön tarpeen ja kehittämistyölle asetettujen tavoitteiden ohjaamana. (Ojasalo ym. 2009, 52–53.)

Kehittämistyössä lähdetään liikkeelle teorioista, metodeista ja aiemmista tutkimuksista. Kirjallisuuteen perehdyttäessä tärkeitä asioita ovat taustat ja menetelmät, joiden pohjalta on käsitelty samankaltaisia ongelmia kuin omassa kehittämistehtävässä. Kehittämiskohteesta kiinnostuneella on usein ilmiöstä jonkinlaista aiempaa tietoa tai osaamista, mikä mahdollistaa alustavan kehittämistehtävän määrittelyn. Aiheeseen pitää kuitenkin ensin perehtyä, ennen kuin tietää, mitä siitä voi kysyä ja mikä todellinen kehittämistehtävä on. Tämän jälkeen on mahdollista lähteä kehittämään täsmentäviä kysymyksiä, jotka auttava tausta-aineiston etsimisessä. (Ojasalo ym. 2009, 53–54.)

Tapaustutkimus usein liitetään erityisesti laadulliseen tutkimukseen ja -menetelmiin, mutta myös määrällisten menetelmien, kuten esimerkiksi kyselyjen hyödyntäminen tutkimuksessa on mahdollista. Aineistot kerätään yleensä luonnollisissa tilanteissa, esimerkiksi tilanteita havainnoimalla tai analysoimalla kirjallisia aineistoja. (Ojasalo ym. 2009, 55.)

### **1.3.2 Dokumenttianalyysi tiedonkeruumenetelmänä**

Valitsin opinnäytetyön tutkimusmenetelmäksi laadullisen tutkimuksen. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa pyritään tutkimaan kohdetta mahdollisimman kokonaisvaltaisesti ja löytämään tosiasioita, pikemminkin kuin todentamaan jo olemassa olevia totuuksia tai väittämiä. Kvalitatiivisen tutkimuksen tyypillisiä piirteitä ovat kokonaisvaltainen tiedon hankinta, induktiivisen analyysimenetelmän käyttäminen, laadullisten metodien käyttö aineiston hankinnassa, kohdejoukon tarkoituksenmukainen valinta, tapausten käsittely ainutlaatuisina ja aineiston tulkitseminen sen mukaisesti. (Hirsjärvi ym. 2000, 152 - 155).

Dokumenttianalyysi on kvalitatiivisen tutkimuksen menetelmä, jossa päätelmiä pyritään tekemään kirjalliseen muotoon saatetusta verbaalisesta, symbolisesta tai kommunikatiivisesta aineistosta. Tarkastelun kohteena olevia dokumentteja voivat olla esimerkiksi www-sivut, lehtiartikkelit, keskustelut, raportit ja muut kirjalliset materiaalit. Tavoitteena on analysoida dokumentteja järjestelmällisesti ja luoda selkeä kuvaus tutkittavasta ja kehitettävästä asiasta. Aineisto pyritään järjestämään tiiviiksi ja selkeäksi ja analyysin tarkoituksena on informaatioarvon lisääminen, jotta voidaan tehdä selkeitä ja luotettavia johtopäätöksiä. (Ojasalo ym. 2009, 121.)

Dokumenttianalyysissä erotetaan kaksi keskeistä analyysitapaa: sisällön analyysi ja sisällön erittely. Sisällön analyysillä tarkoitetaan pyrkimystä kuvata dokumenttien sisältöä sanallisesti ja tunnistaa tekstin merkityksiä. Sisällön erittelyllä tarkoitetaan dokumenttien analyysiä, jossa tekstin sisältöä kuvataan määrällisesti. Aineiston käsittely perustuu loogiseen päättelyyn ja tulkintaan, jossa aineisto hajotetaan osiin, käsitteellistetään ja kootaan uudestaan loogiseksi kokonaisuudeksi. (Ojasalo ym. 2009, 122.)

### **1.3.3 Aineiston hankinnan keinot ja analysointi**

Tutkimus alkoi aiheeseen liittyvän kirjallisuusmateriaalin kartoituksella ja hankkimisella. Vastauksia tutkimuskysymyksiin, kuten hajautettuun sähköntuotantoon, etsittiin ammatti- ja tietokirjallisuuden sekä tutkimusjulkaisujen avulla.

Tutkimusaineiston runko kostuu VTT:n suorittamien tutkimusten loppuraporteista sekä teknillisille yliopistoille suoritetuista diplomi- ja kandidaattitöistä. Tutkimusaineistoa voi pitää luotettavana.

Aineiston analysointi tehtiin aineiston lukemisen aikana kirjaamalla tutkimuskysymyksiin liittyvät asiat muistiin ja kirjoittamalla keskeisimmät tutkimuskysymyksiin vastaavat asiat opinnäytetyön teoriaosuuteen.

## 1.4 Opinnäytetyön rakenne

Ensimmäisessä luvussa käydään läpi työn johdanto ja tavoitteet.

Toisessa luvussa kerrotaan yleisesti hajautetusta energiantuotannosta. Luvussa avataan erilaisia sähköntuotantoon liittyviä teknologioita. Esitellyt teknologiat ovat hyvin soveltuvia hajautettuun sähköntuotantoon.

Kolmannessa luvussa käydään läpi Suomen sähkönjakeluverkko ja sähkömarkkinat. Luvussa tutustutaan sähkön arvoketjuun aina sähköntuotannosta loppukäyttäjälle asti. Luvussa kuvataan sähkömarkkinat karkealla tasolla, menemättä sähkökaupan yksityiskohtiin.

Neljännessä luvussa tutustutaan mitä lainsäädännön näkökulmasta pienimuotoiseen sähköntuotantoon. Luvussa kerrotaan myös lupamenettelyistä, saatavista tuista sekä mahdollisista veroista, joita sähköntuotantoon liittyy.

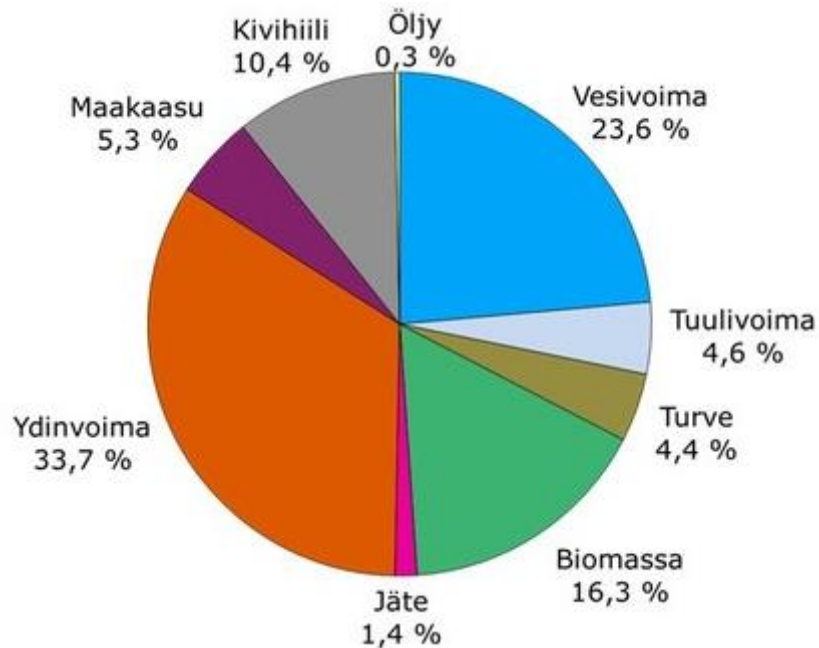
Viidennessä luvussa esitellään hajautetun sähköntuotannon vaikutuksia sähkönjakeluverkkoon. Luvun alussa käsitellään voimalaitoksille määriteltyjä teknisiä ominaisuuksia ja luvun lopussa käsitellään jakeluverkkoon tulevia muutostarpeita hajautetun sähköntuotannon yleistytyä.

Kuudennessä luvussa esitellään tulokset ja johtopäätökset. Tuloksissa ja johtopäätöksissä on asiaa tarkasteltu pääasiassa jakeluverkonhaltijan näkökulmasta.

## 2. Hajautettu energiantuotanto

Suomen sähkön tuotantorakenne on monipuolinen ja siinä hyödynnetään useita eri energialähteitä. Suomen sähköntuotannosta puolet tuotetaan tuonti energiaraka-aineilla kuten kivihieillä, maakaasulla tai uraanilla (kuvio 1). (Energiateollisuus. 2016.) Kuten johdannossa on visioitu, tulee hajautetun ja pienimuotoisen energiantuotannon merkitys ja määrä lisääntymään tulevaisuudessa. Hajautettu energiantuotanto on tuotantomalli, jossa sähkö- lämpö- tai jäähdytysenergia tuotetaan mahdollisimman lähellä loppukäyttäjää. Hajautetulle energiantuotannolle on ominaista, että siinä hyödynnetään paljon paikallisia energiaraka-aineita tai – lähteitä. Tällaisia ovat esimerkiksi biomassa, biopolttoaineet, aurinko- ja tuulienergia sekä maaperään ja vesistöihin varastoitunutta energiapotentiaalia. Hajautetulle energiantuotannolle on ominaista myös pienet energiantuotantoyksiköt tai -ratkaisut. Yleistyessään hajautettu energiantuotanto mahdollistaisi energian, energiaraka-aineen ja energiateknologian tuonnin vähentämisen ja energiamavaraisuuden lisäämisen. (Vihanninjoki 2015, 2.)

Hajautetun sähköntuotannon isot kysymykset liittyvät sen mittakaavaan ja kuinka se integroituu olemassa olevaan sähkönjakeluverkkoon. Tuotantoyksikköjen rakentaminen voi hidastua tai pysähtyä kokonaan kaavoituksellisten ongelmien takia. Tulevissa kaavoissa tulisikin huomioida myös mahdollisuus paikalliseen energiantuotantoon. Tärkeä on myös huolehtia että tuotantoyksiköt rakennetaan ja niitä käytetään ekologisesti, sosiaalisesti ja taloudellisesti kestäväällä tavalla. Hajautetun energiantuotannon vahvuutena voidaan nähdä myös se, ettei se ole sidottu yhteen raaka-aineeseen tai tuotantoteknologiaan. Tämä tuo joustavuutta ja pienentää energiantuotannon markkina- ja teknologiakohtaisia riskejä, joita nykyinen keskitettyyn ja suuria laitosinvestointia vaativaan energiantuotantoon liittyy, kuten Olkiluoto 3 ja Fennovoiman voimalaitosinvestoinnit ovat osoittaneet. (Vihanninjoki 2015, 2.)



Kuvio 1. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin 2016. (Energiateollisuus 2017.)

Yksi hajautetun energiantuotannon kuuluisimmista kohteista on Kempeleen ekokortteli, jossa pääministeri Juha Sipilä on ollut yksi puuhamiehistä. Kyseisellä alueella sijaitsevat yksitoista omakotitaloa on suunniteltu ja rakennettu energiatehokkaiksi ja kortteli on suunniteltu voimalaitoksen ehdoilla hyödyntäen mahdollisimman paljon sähköntuotannossa syntyvää lämpöä talojen lämmitykseen. Alkuvaiheessa Ekokortteli oli energia suhteen omavarainen, eikä se ollut yhdistetty valtakunnalliseen sähköverkkoon, nyttemmin alue on liitetty sähköverkkoon. (Käpylehto 2011, 20-21.)

## 2.1 Hajautetun energiantuotannon teknologiat

Potentiaalisia teknologioita ja tekniikoita hajautettuun ja pienimuotoiseen energiantuotantoon ovat aurinkoenergiat eli aurinkolämpö ja -sähkö, tuulivoima, pienvesivoima, lämpöpumput ja polttoprosesseihin perustuvat hajautetut lämpölaitokset sekä pienimuotoinen yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (Combined Heat and Power eli CHP). Seuraavissa alakappaleissa käydään tarkemmin läpi aurinkosähkö-, tuulivoima- ja yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantojärjestelmiä eli CHP-voimalaitoksista joissa käytetään biopolttoainetta.

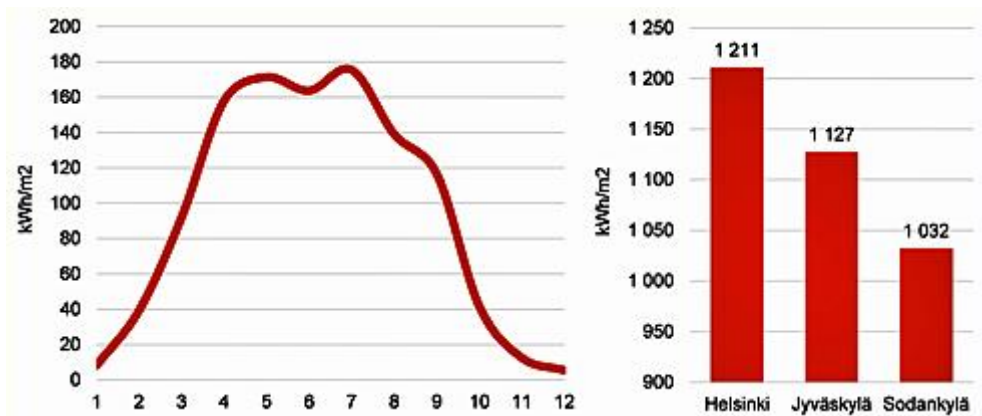
## 2.2 Aurinkosähkö

Maapallolle yhdessä tunnissa tulevassa auringon säteilyssä on tehoa niin paljon, että se vastaa maapallon vuotuista energiantarvetta. Auringon kokonaissäteilyteho on  $3.8 \cdot 10^{20}$  MW ja siitä maapallolle tulee  $1.7 \cdot 10^{14}$  kW. Aurinkoenergialla voidaan tuottaa sekä aurinkosähköä tai -lämpöä. (Hietalahti 2013, 66.)

Auringon kokonaissäteily koostuu sen suorasta säteilystä ja hajasäteilystä. Hajasäteily on ilmakehästä, pilvistä ja maasta heijastuvaa säteilyä ja sen osuus auringon kokonaissäteilystä Suomessa on merkittävä. Sähkön tuotannon kannalta on sama onko kysymys suorasta vai hajasäteilystä. (Motiva 2017.)

Ilmatieteen laitos on laatinut nykyilmaston sääoloja kuvaavia testivuotia, joita voidaan hyödyntää energialaskelmia tehdessä. Suomessa keskimääräiset kokonaissäteilyenergian määrät vaakatasossa ilmatieteen laitoksen mukaan ovat Etelä-Suomessa  $980 \text{ kWh/m}^2$ , Keski-Suomessa  $890 \text{ kWh/m}^2$  ja Pohjois-Suomessa  $790 \text{ kWh/m}^2$ . Kuviossa 2 on esitetty keskimääräiset säteilymäärät  $45^\circ$

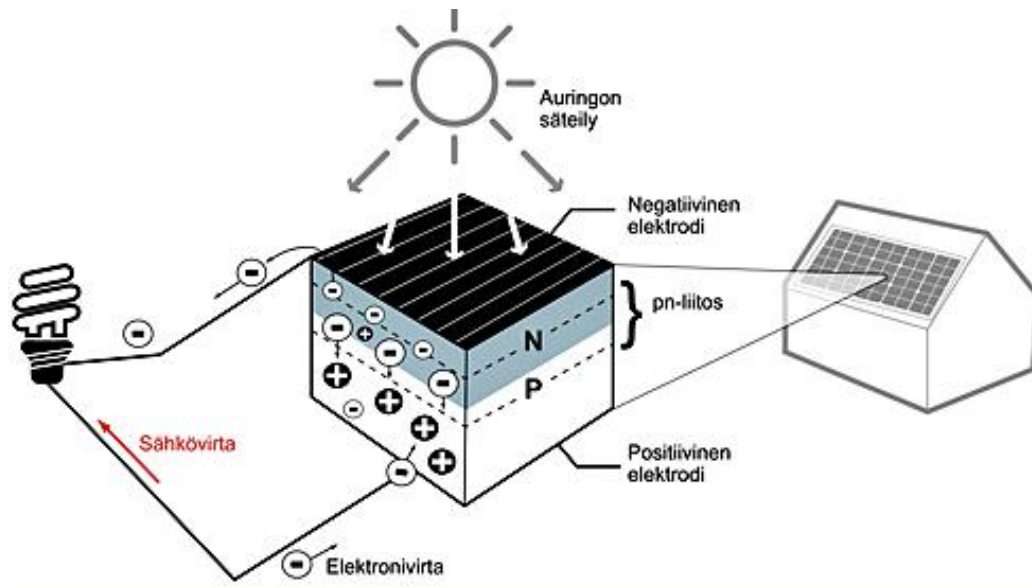
kulmassa etelään päin suunnatulle pinnalle sekä vuotuiset säteilymäärät kolmesta kaupungista. (Motiva 2017.)



Kuvio 2. Auringon kokonaissäteilyenergia Suomessa ja erot eri kaupungeissa. (Motiva 2017.)

Aurinkosähkön tuotannossa auringon säteiden sisältämä säteilyenergia muutetaan aurinkokennossa sähköenergiaksi. Aurinkokennojen sähköntuotanto perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa puolijohdeeseen osuvat fotonit saavat aikaan potentiaalieron kahden yhteen liitetyn puolijohdemateriaalin rajakerroksessa. Puolijohdeesta käytetään yleisesti nimitystä PN-tyyppin puolijohde. Nimitys tulee materiaaleista, joista puolijohde on valmistettu. P-tyyppin puolijohde on seostettu positiivisesti varautuneeksi, kun taas N-tyyppin puolijohde negatiivisesti. Kun sopivalla taajuudella säteileviä fotoneja osuu valosähköiseen puolijohdeeseen, seurauksena tästä syntyy puolijohdeen yli jännite-ero ja aurinkokenno tuottaa sähköenergiaa kuten kuviossa 3 on kuvattu. (Hietalahti 2013, 67.)





Kuvio 3. PN-liitokseen perustuvan aurinkokennon toimintaperiaate. (Motiva 2017.)

Aurinkokennojen valmistuksessa puolijohteena käytetään yleisimmin piitä (Si), piikkenojen hyötysuhde on 5-20 % ja se riippuu kennon rakenteesta ja valmistustekniikasta. Ympäröivän ilman lämpötila vaikuttaa olennaisesti kennojen hyötysuhteeseen. Yksikiteisellä piistä valmistetulla aurinkokennolla päästään parempaan hyötysuhteeseen kuin monikiteisellä piikennolla. Yksikiteisen kenno rakenne on monimutkaisempia ja siksi ne ovat kalliimpia. Piin lisäksi on kehitetty myös muita hyötysuhteeltaan parempia aurinkokennomateriaaleja. Tällaisia ovat esimerkiksi kahdesta materiaalista valmistettu galliummarseeni-galliumantimoni-dikenno (GaAs/GaSb), joka teknisesti ylittää parhaillaan 35 % hyötysuhteeseen. Hyötysuhdetta saadaan parannettua, koska aurinkokennoissa käytetään useampia materiaaleja, näin pystytään hyödyntämään laajempi auringonvalon spektri-alue. (Hietalahti 2013, 68.)

Aurinkosähköjärjestelmät voidaan jakaa eri kategorioihin niiden käyttötarkoituksen ja koon mukaan:

- liikuteltavat laitteet esim. akkujen latauslaitteet
- sähköverkon ulkopuoliset järjestelmä esim. kesämökit
- sähköverkkoon kytketyt pientalojärjestelmät
- sähköverkkoon kytketyt isojen kiinteistöjen ja yritysten järjestelmät
- teollisuuskokoluokan aurinkosähkövoimalaitokset

Aurinkosähköjärjestelmät koostuvat aurinkopaneeleista, joita sarjaan tai rinnan kytkemällä saavutetaan haluttu jännite- ja tehotaso. Usein aurinkosähköjärjestelmään lisätään myös akusto, jonka ansiosta pystytään tasamaan tuotannon ja kulutuksen välisiä ajallisia eroja. (Motiva 2017.) Mikäli aurinkosähköjärjestelmällä tuotetaan sähköä sähköverkkoon, silloin tarvitaan myös vaihtosuuntaaja muuntamaan tasasähkö vaihtosähköksi. (Hietalahti 2013, 68.)

Halventuneet järjestelmät ja lisääntynyt tarjonta kasvattavat aurinkoenergian käyttöä sähköntuotannossa. Finsolar oli Tekesin rahoittama hanke, jota koordinoi Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulun tiimi. Taulukossa 1 on hankkeen keräämät keskimääräisiä aurinkosähköjärjestelmien avaimet käteen -asennushintoja. Yksikköhinnat sisältävät teknisenjärjestelmän ja järjestelmän asennuksen. (Finsolar 2017.) Suomessa aurinkoenergiaa käytetään lähinnä kiinteistökohtaiseen energiantuotantoon ja vuoden 2015 tietojen mukaan aurinkosähköä on asennettu yhteensä 20 MWp edestä. Suurimpia aurinkosähköntuottajia ovat Ruokakesko Oy, Helen Oy ja Suomen Voima näiden kolmen osuus kokonaistuotannosta on lähes 20%. (NeroWatt Oy 2017.)

Yritykset ja yhteisöt voivat hakea Tekesiltä energiatukea aurinkosähköhankkeisiin. Tukea voisi saada enintään 25 % hankkeen kustannuksista. Tuen ulkopuolelle on rajattu asunto-osakeyhtiöt, asuinkiinteistöt, maatilat, valtionosuutta saavat perustamishankkeet sekä valtion virastot tai laitokset. (Tekes 2017.) Maatiloilla on mahdollisuus hakea ELY-keskukselta investointitukea aurinkosäh-

köjärjestelmään siltä osin, kun tuotettava energia käytetään maatalouden tuotantotoiminnassa. (Mavi 2017.) Yksityishenkilöt voivat hakea kotitalousvähennystä aurinkosähköjärjestelmän asennustyön osuudesta. (Vero 2017.)

Taulukko 1. Aurinkosähköjärjestelmien hankintahinnat keskimäärin vuosina 2014-2016. (Finsolar 2017.)

Kategoria* / koko kW	Tyypillisiä sovelluskohteita ja lisätietoja	Hinnat €/kWp (ALV 0%)
Verkkoon kytketyt yli 1 000 kW (1 MW) järjestelmät, maa-asennus	Teollisen mittakaavan aurinkovoimalat, joista tuotanto myydään sähköpörssiin. Voimalaitoksia ei vielä ole Suomessa.	1 200 – 1 000 €/kWp
Verkkoon kytketyt yli 250 kW järjestelmät, kattoasennus	Aurinkosähköä tuotetaan teollisuus- tai isoissa kaupan alan kiinteistöissä omaan kulutukseen.	1 300 – 950 €/kWp
Verkkoon kytketyt 10 – 250 kW järjestelmät, kattoasennus	Aurinkosähköä tuotetaan toimisto- ja kaupparakennuksissa ja kuntakiinteistöissä omaan kulutukseen.	1 350 – 1 050 €/kWp
Verkkoon kytketyt alle 10 kW järjestelmät	Aurinkosähköä tuotetaan omakotitaloissa ja muissa pienissä rakennuksissa omaan kulutukseen.	2 000 – 1 300 €/kWp
Yli 1 kW aurinkosähkö- ja akkujärjestelmät (off-grid)	Aurinkosähköä tuotetaan sähköverkon ulkopuolisiin kesämökkeihin ja muihin pieniin rakennuksiin.	3 500 €/kWp
Alle 1 kW aurinkosähkö- ja akkujärjestelmät (off-grid)	Aurinkosähköä tuotetaan veneissä, asuntovaunuissa ja pienillä kesämökeillä omaan kulutukseen.	5 000 €/kWp

### 2.3 Tuulivoima

Tuulet syntyvät siten, että auringon säteily lämmittää maata sekä ilmaa, jolloin lämmennyt kevyempi ilma nousee ylöspäin. Tästä seuraa maan pinnalla ilman paineen aleneminen. Paineen tasoittumisesta seuraa ilmassojen liike, joka saa aikaan tuulen, jonka suunta on korkeapaineesta matalapaineeseen. Ilmapaine-eron suuruus vaikuttaa tuulen voimakkuuteen. (Huhtinen ym. 2011, 280.)

Tuulivoimalan käyttövoimana toimii tuuli, tämän johdosta asennuspaikka tulee valita huolellisesti. Paras asennuspaikka on sellainen, missä on vallitsevasta tuulensuunnasta paljon avointa ja esteetöntä aluetta, jossa tuuli voi kiihdyttää vauhtiaan. Suomessa tuulivoimaloiden ihanteellisimmat sijoituspaikat sijaitsevat merellä, meren rannikolla, sisävesistöjen rannoilla, tuntureilla, kukkuloilla ja mäkien huipuilla. Asennuspaikkaa valittaessa tulee huomioida se, että sen ympäristö on mahdollisimman esteetön, sillä kaikki esteet esimerkiksi rakennukset ja puut aiheuttavat tuuleen turbulenssia eli pyörteisyyttä. Tämä heikentää tuulen tehoa ja voi rasittaa voimalan rakenteita. Lisääntynyt rasitus lyhentää voimalan käyttöikä ja aiheuttaa lisääntynyttä kunnossapidon ja huollon tarvetta. Tuulivoimalan etäisyys esteeseen tulee olla vähintään kymmenen kertaa esteen korkeuden verran. Tällöin esteen aiheuttama pyörteily ei ole enää merkittävä. (Hietalahti 2013, 60.)

Tuulivoimalan toiminta perustuu siihen, että se muuttaa tuulen liike-energian pyörimisliikkeeksi ja edelleen generaattorin avulla sähköksi. Nykyiset tuulivoimalat perustuvat lentokonetekniikkaan eli virtausdynamiikkaan ja paine-ero ilmiöön. Näitä potkurivoimaloita kutsutaan vaak akseliseksi voimaloiksi (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine). Toinen harvemmin käytetty tekniikka on pysty akselinen voimala (VAWT, Vertical Axis Wind Turbine). Tässä mallissa toiminta perustuu tuulen työntävään vaikutukseen, aerodynaamisen voimaan tai näiden yhdistelmään. (Eklund 2011, 4.)

Uudet rakennettavat tuulivoimalat ovat yleensä kolmilapaisia, tässä mallissa optimoituu tuulesta saatavan tehon hyötysuhde, materiaalikustannukset sekä mekaaniseen rasitukseen liittyvät tekijät. Kolmilapaisella tuulivoimalla on hyvä tehon hyötysuhde, tämä tulee suoraan siitä, että voimalan pyyhkäisy pinta-ala on suuri. Tuulivoimalaitoksen energian tuotto on suoraan verrannollinen pyyhkäisy pinta-alaan. Kolmilapaisen potkurin pinta-ala suhteessa pyyhkäisy pinta-alaan on pieni vain 2-3 %, tämän ansiosta vähällä materiaalilla saavutetaan suuri pyyhkäisy pinta-ala. (Hietalahti 2013, 59.)

Tuulivoimalan sähkölaitteiden mitoittamiseksi lasketaan jatkuva maksimaalinen tuottoteho eli se teho, jonka laitteisto voi tuottaa sähköverkkoon kuormittumatta itse liikaa. Tuulivoimalan tuottama teho voidaan johtaa seuraavasta kaavasta:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \pi * R^2 * v^3 * c_p$$

P = Teho [W]

$\rho$  = Ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

R = Roottorin ulkosäde

v = Tuulennopeus

$c_p$  = Roottorin tehokerroin

(Hietalahti. 2013. 59)

Tuulivoiman ero moneen muuhun sähköntuotantomuotoon on tuotannon vaihtelevuus sekä energian tuotannon huono ennustettavuus. Tähän ongelmaan on tarttunut myös BCDC energia -tutkimushankkeen tutkijatiimi (BCDC nimi tulee Bright Clouds – Dark Clouds), jotka ovat luoneet energiasääennusteen. Tämä perustuu ennusteeseen auringon paisteen ja tuulen voimakkuudesta kilowattitunteina seuraavan 24 tunnin aikana paikkakuntaakohtaisesti. Ennustemalli perustuu Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-säänennustusmalliin (High Resolution Limited Area Model). Energiasääennusteesta hyötyvät sähköverkon ylläpitäjät kuin myös energiamarkkinat. Ennuste mahdollistaa tarkemman tiedon aurinko- ja tuulisähkön tarjonnasta jolloin voidaan paremmin arvioida muun sähköntuotannon tarvetta. Ennusteesta on hyötyä myös pientuottajille, he voivat hyödyntää sitä oman sähkönkäyttönsä optimointiin. Tämä voisi tapahtua esimerkiksi ohjaamalla kulu- tusta tunneille, jolloin ennusteen mukaan omaa tuotantoa on paljon. (Lindfors 2017.)

Tuulivoimalaitosten tuotantolukuja voidaan verrata kahdella tunnusluvulla, joko suhteuttamalla tuotanto nimellistehoon, jossa tuotettu sähköenergia jaetaan nimellisteholla (kWh/kW) tällöin puhutaan huipunkäyttöajasta tai roottorin pyörähdympinta-alaan (kWh/m<sup>2</sup>). Hyvinä tuotantolukuina pidetään jos, huipunkäyttöaika on yli 2400 h tai jos vuosituotanto ylittää 1000 kWh/m<sup>2</sup>. (Hietalahti 2013, 63.)

Vuoden 2015 lopussa Suomessa oli toiminnassa 387 tuulivoimalaa, joiden yhteisteho oli 1005 MW. Tuulivoimalla tuotettiin noin 2,8 % Suomen sähkönkulutuksesta 2,3 TWh kun kokonaiskulutus oli 82,5 TWh. Huipunkäyttöaika vuonna 2015 on ollut 2289 tuntia eli tuulivoimalaitokset ovat olleet toiminnassa 26 % kyseisen vuoden tunneista. (VTT 2017)

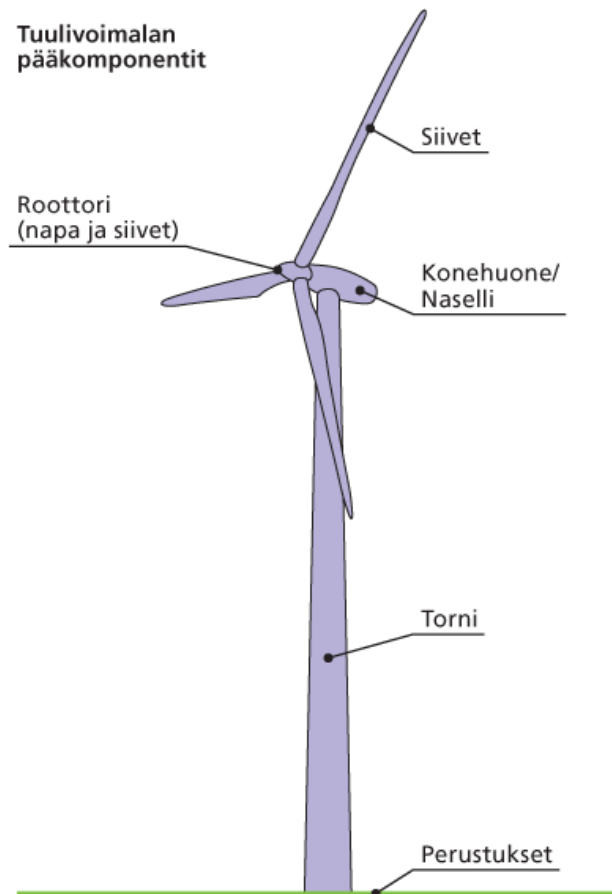
Vuoden 2015 huipunkäyttöaika  $t_h$  on laskettu seuraavasti:

$$t_h = \text{Tuotto (kWh)} \div \text{Nimellisteho (kW)}$$

Luku  $t_h$  kuvaa mitoitus-tehon kokonaisaika, jolloin tuulivoimala on tuottanut nimellistehollansa energiaa, muulle ajalle tuotto oletetaan nolaksi. Tuulivoimaloiden vuosittainen sähköntuotanto jää varsin alhaiseksi, kun asennettua laitekapasiteettia verrataan muihin sähköenergian tuotantotapoihin. Tämä on johtanut siihen, että tuulienergian tuotantoa joudutaan tukemaan voimakkaasti. (Hietalahti 2013, 63.)

Hajautettuna sähköntuotantona käsitellään vain yksittäiset pienitehoiset jakeluverkkoon liitetyt tuulivoimalat. Useamman tuulivoimalan tuulipuistot ovat jo keskitettyä sähköntuotantoa ja ne on liitettävä siirtoverkkoon. Tuulivoimaloiden tuottamat tehot ovat suoraan verrannollisia tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin. Tuulivoimalat toimivat, kun tuulen nopeus on noin 3-25 m/s, tuulen nopeuden noustessa yli 25 m/s tuulivoimalat joudutaan pysäyttämään, jotta vältetään laitevaurioilta. (Elovaara ym. 2011, 40-41.)

Tuulivoimala koostuu lavoista, konehuoneesta jossa sijaitsee muun muassa generaattori ja vaihteisto, muuntajasta, tornista ja perustuksista. Pientuulivoimalalla ja teollisen kokoluokan tuulivoimalalla on samat laatuvaatimukset. Tuulivoimaloiden pitää kestää myrskytuulet aiheuttamatta varaa ympäristölleen ja kuitenkin toimia jo heikolla tuulella sekä kestää pakkasta, sadetta ja muuta ympäristön kuormitusta. IEC onkin standardoinut pientuulivoimaloiden tekniset vaatimukset IEC 61400-2, 2.ed. -standardiin ja tämän standardin mukaan suunniteltua voimalaa voidaan pitää luotettavana. (Eklund 2011, 6.)



Kuvio 4. Tuulivoimalan pääkomponentit. (Lappeenrannan Energia Oy)

Pientuulivoimaloihin kuuluvaksi luetaan voimat, joiden potkuri pinta-ala on alle 200 m<sup>2</sup>, käytännössä tämä tarkoittaa nimellisteholtaan alle 50 kW:n laitteita. Pientuulivoimalalle tarvitaan rakennus- tai toimenpidelupa rakennuspaikasta riippuen. Pientuulivoimalan sijoituksessa tulee huomioida se, että siitä voi aiheutua lähistölle melu- ja vilkkumishaittoja. Vilkkumista aiheuttaa se, että aurinko paistaa tuulivoimalan pyörivien siipien takaa ja siipien pyöriväliike saa auringon vilkkumaan. Paikan valinnassa pitää huomioida myös se, että tuulivoimalaan voi talvella kertyä jäätä, joka sulaessaan voi tippua maahan. (Eklund 2011, 15-16.)

Suomessa tuulivoimalle maksetaan markkinaehtoista takuuhintaa, joka on 83,5 €/MWh. Tukea saa 12 vuoden ajan ja se on laskettu niin, että se kattaisi noin 40 % maalle rakennettavien turbiinien investointikustannuksista. Syöttötariffi koskee vain uutena rakennettavia tuulivoimaloita, jotka rakennetaan Suomeen tai Suomen aluevesille. Tariffijärjestelmään mukaan pääsevät vain ne laitokset, joiden liityntäteho on vähintään 500 kW eli pienet kiinteistöihin hankittavat laitteistot rajautuvat tukien ulkopuolelle. Syöttötariffin piiriin pääsee Suomessa tuulivoimahankkeita 2500 MW:n edestä ja kapasiteetti on jo täynnä. (Suomen Tuulivoimayhdistys Ry 2017.)

Yksiselitteistä hintaa tuulivoimalaitokselle ei voi antaa, mutta arvio on, että tuulivoiman investointikustannukset ovat noin 1300 - 1400 €/kW maalla ja noin 2500 €/kW merellä. Hinnat ovat teollisen koko luokan tuulivoimaloiden, pientuulivoiman investointikustannus on 2000 € ylöspäin. Investointikustannuksista tuulivoimalaitoksen osuus kuivalla maalla on 65 – 80 % välillä ja merellä 50 – 60 % välillä, loppuosa koostuu maanrakennustöistä, sähkötöistä sekä liittymistä, suunnittelusta, valvonnasta ja vakuutuksista. (Suomen Tuulivoimayhdistys Ry 2017.)



## 2.4 Biopolttoainetta käyttävät CHP –voimalaitokset

Polttoprosesseihin perustuvat tekniikat muodostavat huomattavan osan hajautetun energiantuotannon kokonaispotentiaalista. Polttoprosesseilla saadaan tuotettua lämpöä, joka voidaan jatkojalostaa sähköenergiaksi generaattoreilla. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto eli CHP-tuotanto (Combined Heat and Power) on Suomessa yleistä keskitetyissä suuren kokoluokan laitoksissa, mutta pienen mittakaavan ratkaisut eivät ole lähteneet yleistymään. Parhaimmillaan yhteistuotantolaitoksen kokonaishyötysuhde on yli 90 prosenttia eli voimalaitoksen käyttämästä polttoaineesta lähes kaikki saadaan muutettua energiaksi. Yhteistuotannossa säästyy kolmannes energiasta, jos sitä verrataan siihen, että lämpöä ja sähköä tuotettaisiin erikseen omissa prosesseissaan. Lisäksi kannattaa huomioida myös se, että myös hiilidioksidipäästöt pienenevät kolmanneksen. (Karjalainen 2012, 10.)

Pien- ja mikro-CHP voimalaitoksien yleistymistä on hidastanut kaupallisten laitteiden pieni valikoima ja korkea hinta. Pienten CHP -laitteistojen kustannustehokkuutta pitäisi kasvattaa tekniikoita ja tuotantoprosesseja kehittämällä, jolloin sähkön ja lämmön yhteistuotannosta saataisiin taloudellisesti kannattavaa myös pienessä mittakaavassa. (Karjalainen 2012, 10.)

Pienimuotoinen sähkön ja lämmön yhteistuotanto voi perustua erilaisiin teknologioihin ja polttoaineratkaisuihin. Siinä yhteydessä on tyypillisesti kiinnitetty huomiota uusiutuvien ja bioperäisten polttoaineiden eli bioenergian käyttöön. Polttoaineen alkuperän mukaan pien-CHP voidaan jakaa esimerkiksi seuraavasti:

- Maakaasun käyttöön perustuva pien-CHP
- Puupohjaisten polttoaineiden käyttöön perustuva pien-CHP
- Biokaasun (mädätys) käyttöön perustuva pien-CHP

Maakaasun käyttöön perustuva pien-CHP on Suomessa toistaiseksi mahdollista lähinnä maakaasuverkon alueella, kun sen sijaan puupohjainen ja biokaasu-CHP ovat mahdollisia koko maassa. (Pesola ym. 2012, 7.)

Biokaasua tuotetaan biologisella prosessilla, jossa pääraaka-aineena käytetään orgaanista ainesta. Raaka-aineena eli substraattina biokaasun valmistuksessa voi toimia hyvin erilaiset biomassat esimerkiksi maatalouden, yhdyskunnan tai teollisuuden erilaiset jätteet tai sivutuotteet. Raaka-aineen sisältö on tyypillisesti hyvin helposti biohajoavaa ainesta, kuten hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja. Nämä aineet ovat helposti hajoavia ja tuottavat nopeasti biokaasua hapettomissa olosuhteissa. Puu sen sijaan on sisällöltään vaikeasti hajoavaa orgaanista ainesta, eikä sovellu sellaisenaan biologisen biokaasuprosessin raaka-aineeksi. (Kymäläinen ym. 2015, 21.)

Metsäpolttoaineeksi luetaan energiakäyttöön tarkoitettu puu, josta yleisesti käytetään nimitystä energiapuuta. Energiapuuta on puu joka ei kelpaa metsäteollisuuden ainespuuksi, näitä ovat esimerkiksi karsimaton kokopuu, hakkuutähteet ja kannot. Vaikka puupolttoaineiden käyttö on lisääntynyt, löytyy kasvu potentiaali edelleen. Metsähake jota tuotetaan hakkuutähteistä, kannoista ja pienen halkaisijan energiapuusta omaa suuren ja vielä toistaiseksi vähäisesti hyödynnetyn biopolttoaine potentiaalin. Haasteena on polttoaineen laadun epätasaisuus sekä polttoaine logistiikan hallinta. (Wallin 2012, 13-15.)

Pien-CHP-laitteet pohjautuvat yleisesti seuraaviin prosesseihin:

- Höyryturbiinit / höyrymoottorit
- Kaasukäyttöiset polttomoottorit
- Polttokennot
- Stirling
- Mikroturbiinit

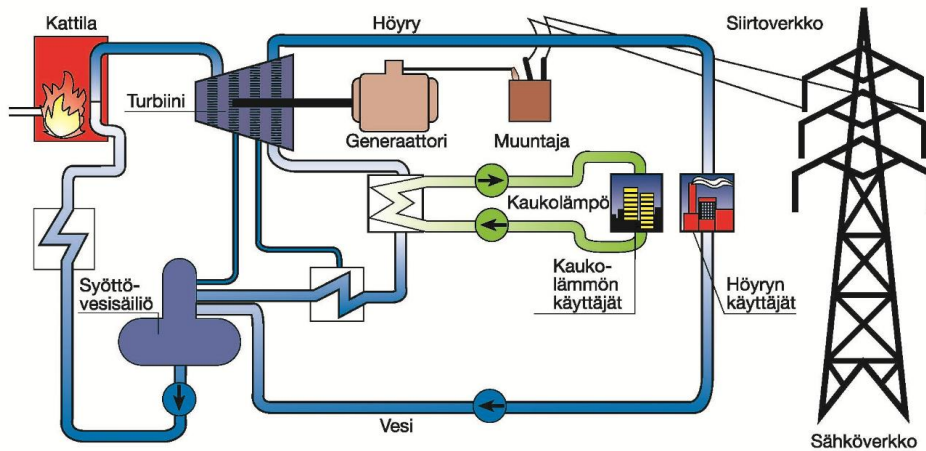
- Kaasuturbiinit
- Kuumailmaturbiinit (HAT, Hot Air Turbine)
- ORC – lämpöturbiinit (ORC, Organic Rankine Cycle)

(Pesola ym. 2012, 7.)

### **Höyryturbiinit**

Höyrymoottorit ja -turbiinit ovat yleisimpiä CHP-energian tuotantomenetelmiä. Toimintaperiaatteena höyryturbiineissa on, että paineistettu höyry kulkee turbiinin siipien läpi, joka pyörittää siihen kytkettyä generaattoria. Kattilan ja höyrykoneen muodostamassa CHP-voimalassa lämpöenergialla tuotetaan höyrykattilassa höyryä, joka johdetaan höyrykoneeseen joka pyörittää siihen kytkettyä generaattoria. Höyrykoneessa korkeapaineinen höyry liikuttaa sylinterissä mäntää, joka yhdistetään kampiakselilla generaattoriin tuottamaan sähköä. Höyrykoneiden ja -turbiinien tarvitsema höyry tuotetaan erillisissä kattiloissa, joten polttoaineeksi sopii nestemäinen, kiinteä tai kaasumainen bio- tai fossiilinen polttoaine. Energiapuuhaake sopii hyvin höyryturbiinien ja -koneiden energianlähteeksi. (Karjalainen 2012, 2.)

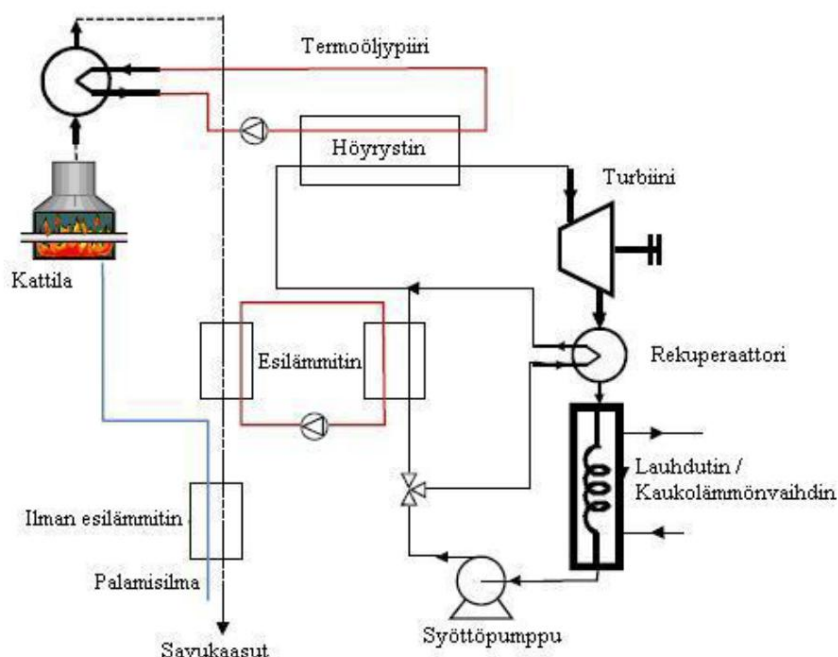
Höyryprosesseissa päästään 60 – 85 % kokonaishyötysuhteeseen, kun sähköntuotannon hyötysuhde on 15 – 20 % kokonaistehosta. Sähköntuotannon hyötysuhde on riippuvainen lämmöntarpeesta, koska osakuormilla toimivan laitoksen sähköntuotannon hyötysuhde laskee. Pienemmän kokoluokan CHP-laitoksilla hyötysuhteet ovat isoja laitoksia huomattavasti pienempi. (Karjalainen 2012, 2.)



Kuvio 5. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto höyryprosessilla. (Energiateollisuus 2017)

### ORC-prosessi

ORC- prosessi on tekniikaltaan lähes kuin höyryprosessi. Molemmat tekniikat perustuvat siihen, että kaasun lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi samanlaisessa höyryturbiinissa. Erona ORC -prosessissa on se, että kiertoineena veden sijasta käytetään orgaanista nestettä joka voi olla esimerkiksi öljyä. Orgaanisen nesteen suhteellinen latenttilämpö on huomattavasti pienempi kuin vedellä, jolloin yhden painetason ORC -prosessissa saavutetaan vähintään sama hyötysuhde kuin vesihöyryprosessilla. Tästä seuraa, että ORC- prosessi toimii alhaisemmassa lämpötilassa, kuin höyry -prosessit. Tästä johtuen ORC-prosessi soveltuu paremmin käytettäväksi pienen kokoluokan CHP-laitoksissa. Sähkön tuotannossa sen hyötysuhde on 15 - 20 %, eikä se pienene yhtä jyrkästi osakuormalla ajettaessa, kuin esimerkiksi höyryprosessissa tapahtuu. Lämmön hyötysuhde ORC-prosessissa on 60 - 70 %. (Karjalainen 2012, 2.)

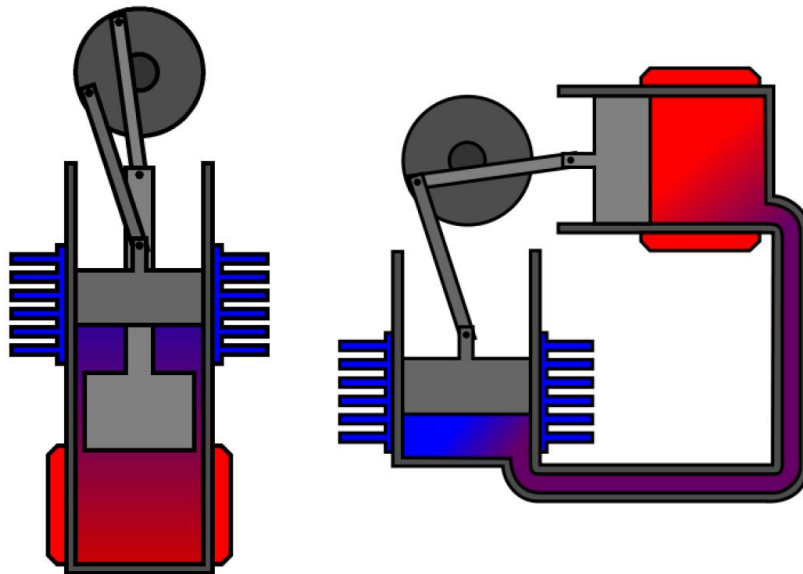


Kuvio 6. Periaatekuva ORC-prosessista. (Purhonen 2010.)

### Stirling -moottori

Stirling -moottori on lämpömoottori, jonka toiminta perustuu ilman tai muiden kaasujen syklisen puristukseen ja laajenemiseen eri lämpötiloissa siten, että lämpöenergia muunnetaan mekaaniseksi työksi. Stirling-moottoreiden voiman tuotto perustuu lämpötila-eroon kylmän ja kuuman pään välillä, jossa työkaasu liikkuu jaksoittain kuumen ja kylmän pään välillä. Stirling-moottorissa kylmän- ja kuumenpään männät kiinnittyvät samalle akselille. Kuumassa päässä kaasu laajenee lämmön vaikutuksesta liikuttaen työmäntää josta seuraa, että laajentunut kaasu liikkuu kohti kylmää päätä. Kylmässä päässä kaasu jäähtyy, jolloin syrjäyttämääntä puristaa kaasua jolloin sen paine kasvaa ja kaasu siirtyy kohti kuumaa päätä. Mitä suurempi kuumen ja kylmän pään lämpötilaero on, sitä parempi sähköteho saadaan. Stirling -moottorilla hyötysuhde on korkeampi verrattuna höyrykoneisiin, sähköhyötysuhde 15-35 % ja kokonaishyötysuhde 75-85 %. Stirling -moottorin tehoa voidaan lisätä, jos paineistetaan työaineena toimiva kaasu esimerkiksi ilma, vety tai helium. (Karjalainen 2012, 3.)

Stirling-syklit on jaettavissa alfa-, beta- ja gamma-tyyppeihin riippuen sylintereiden ja lämmönvaihtimien geometrisestä sijoittelusta. Alfa-tyypin stirling-moottorissa työkaasu liikkuu erillisten kuumen ja kylmän pään välillä. Beta-tyypin stirling-moottorissa kokoonpuristuminen ja laajentuminen tapahtuvat samassa sylinterissä yhdellä työmännällä ja erillinen syrjäyttämäntä liikuttaa työkaasua kylmän ja kuumen pään välillä. Gamma-tyypin stirling-moottorissa toiminta on periaatteessa sama kuin beta-tyypin moottorilla erotuksena on, että työmäntä on omissa erillisessä sylinterissä. (Kallio 2016, 20.)

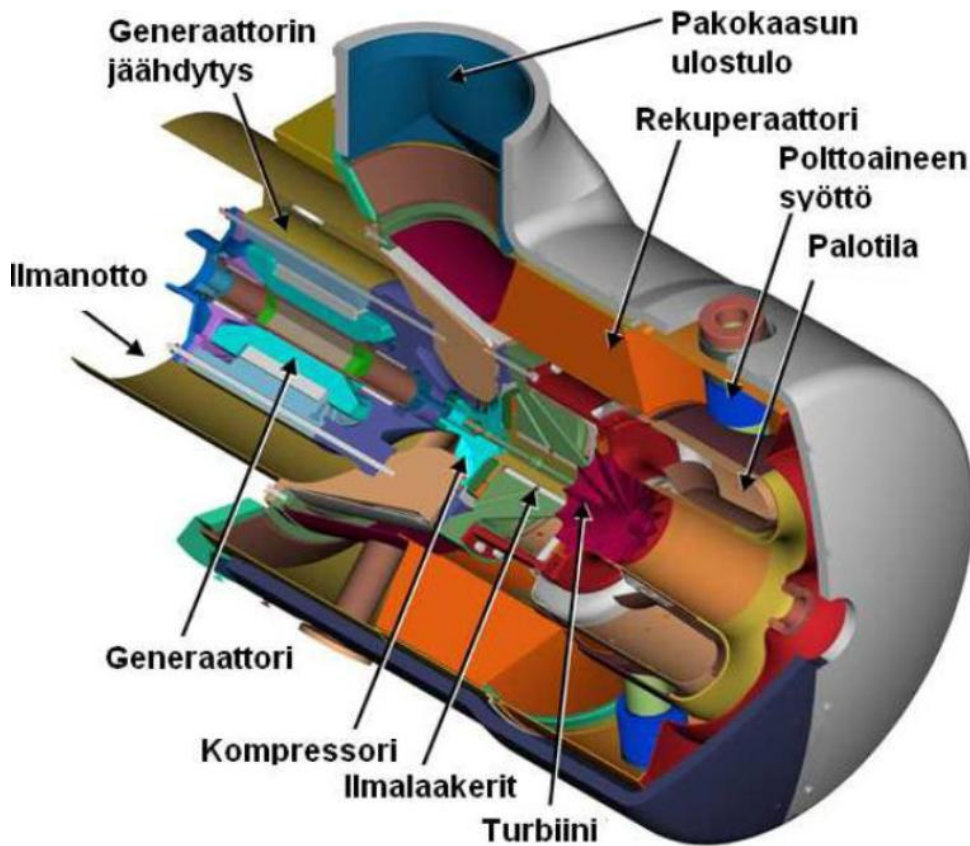


Kuvio 7. Stirling-moottorin periaate oikealla alfa- ja vasemmalla beta -tyypin moottori. (Karjalainen 2012, 3.)

### Mikroturbiinit

Mikroturbiinit ovat kokoluokaltaan 25 - 250 kW:n kaasuturbiineja, joissa polttoaine palaa polttokammiossa ja josta pakokaasu johdetaan suoraan kaasuturbiiniin. Kompressorissa syöttöilma paineistetaan, ennen kuin sitä syötetään polttokammioon. Mikroturbiini rakennetaan yleensä yksi akseliseksi, johon sitten generaattori

tori, kompressori ja turbiini laakeroidaan. Mikroturbiinit ovat pyörimisnopeudeltaan suuria, jolloin generaattoreiden vaihtovirta on korkeataajuisista ja se on muuttettava verkkotaajuiseksi taajuusmuuttajalla. (Karjalainen 2012, 4.)



Kuvio 8. Mikroturbiinin rakenne. (Karjalainen 2012, 5.)

Mikroturbiinin toimintaperiaate on, että kompressorilla työnnetään ilmaa palotilaan ja sitten palotilassa ilman sekaan johdetaan polttoainetta. Palavasta seoksesta syntyvä pakokaasu virtaus ohjataan turbiinipyörän läpi ja saa turbiinin pyörimään korkeilla kierrosnopeuksilla. Polttoaineena mikroturbiineissa voidaan käyttää kaasumaista tai nestemäistä polttoainetta. Mikroturbiineissa käytetään yleisesti maakaasua, mutta biokaasun käyttö on myös lisääntymässä. Mikrotur-

biineiden hyötysuhdetta voi parantaa rekuperaattorilla, jonka tehtävänä on varastoida lämpöenergiaa poistuvasta pakokaasusta ja siihen varastoituneella energialla esilämmittää sisään tulevaa kaasua. Ilman rekuperaattoria rakennetuilla pienillä mikroturbiineilla sähköhyötysuhde jää yleensä 25 %:n alapuolelle. Yhteistuotantokäytössä mikroturbiineilla päästään tyypillisesti 75 - 85 % kokonaishyötysuhteeseen. (Kallio 2016, 23.)

### **Polttomoottori**

Polttomoottorit ovat vakiinnuttaneet paikkansa sähköntuotannossa ja niitä on saatavilla laajalla tehoalueella, aina pienistä kilowattien aggregaateista megawattiluokan moottoreihin. Moottorivoimalaitoksien etuja ovat korkea hyötysuhde, laaja tehoalue sekä monipuolinen polttoainevalikoima. Muita etuja ovat esimerkiksi lyhyt rakennusaika sekä modulaarinen rakenne. Huonoja puolia polttomoottoreissa on, että ne ovat meluisia ja vaativat säännöllistä huoltoa ja se, että huoltoväli on yleensä lyhyt. Kaasu- ja dieselmoottorien sähköhyötysuhde on 30 - 45 % ja kokonaishyötysuhde 75 - 90 %. Tehon lisäksi polttomoottorit voidaan lajitella polttoaineen perusteella kaasu-, diesel- ja kaksoispolttoainemoottoreihin. Suurimmat polttomoottorit, joita käytetään CHP-laitoksissa ovat kaasukäyttöisiä määntämoottoreita. Varavoimakoneissa käytetään yleisesti dieselmoottoreita. (Karjalainen 2012, 6)

Polttomoottoreita on mahdollista muuntaa käyttämään polttoaineena myös biopolttoainetta tai puukaasua. Kaksoispolttoainemoottoreissa dieselpolttoaineen sekaan suihkutetaan kaasua imuilman mukana. Kaasumoottorit soveltuvat parhaiten kohteisiin, joissa sähkön ja lämmön tarve on tasainen ja missä vaaditaan hyvää sähköntuotannon hyötysuhdetta. (Karjalainen 2012, 6.)

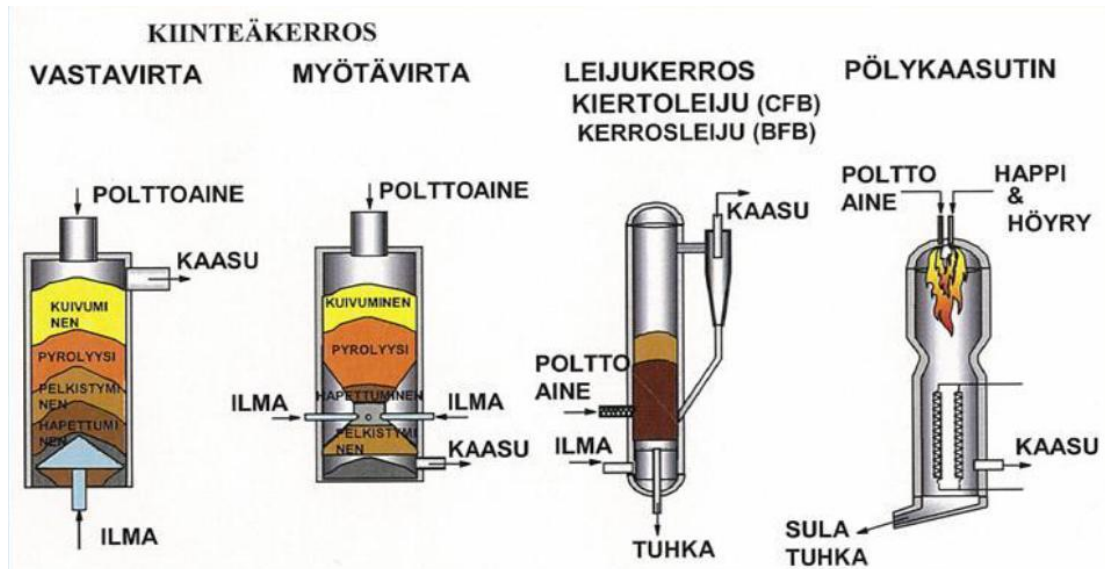




Kuvio 9. GE Jenbacherin 350 kWe 8-sylinterinen kaasumoottori. (Karjalainen. 2012. 7)

### **Puun kaasutus**

Puun kaasutus perustuu pyrolyysiprosessiin, jossa puun biomassasta erotetaan kaasuuntuvia ainesosia korkea lämpötilaisessa vähähappisessa prosessissa. Tämän vähähappisen palamisen ja kaasutuksen seurauksena syntyvä puukaasu on vielä puhdistettava noesta, hiilestä sekä muista hiukkasista, jonka jälkeen se on käytettävissä hyötysuhteeltaan tehokkaasti esimerkiksi polttomoottorissa. Puukaasu koostuu metaanista, vedystä ja hiilimonoksidista. Energialähteenä siihen voi toimia metsähake, mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteet tai mahdollisesti muut biomassat. Puuhakkeen laatu ja etenkin sen kosteuspitoisuus on asettanut tiukkoja vaatimuksia haketettavan biomassan valinnalle ja käsittelylle. Suurin este kehitykselle on kuitenkin ollut terva, jota syntyy pyrolyysin seurauksena. Polttoaineen mukana oleva terva tuhoaa moottorit pitkäaikaisessa käytössä. (Gasek Oy 2017.)



Kuvio 10. Puun kaasutustekniikat. (Karjalainen. 2012. 8)

Puunkaasutuksessa valtaosa tekniikoista perustuu myötävirtakaasutukseen. Myötävirtakaasutuksessa sekä polttoaine että hapetuskaasut kulkevat samaan suuntaan. Myötävirtakaasutuksessa kaasu johdetaan pyrolysoituvan puun sekaan, tällöin puusta vapautuvat haihtuvat aineet hapettuvat. Näin syntynyt reaktiotuote ohjataan reaktorin kurkun läpi niin, että palamisvyöhykkeen läpäisseet tervat palavat kuumalla hiilipedillä. Vastavirtaperiaate tekniikassa polttoaine syötetään reaktorin yläosaan ja kaasuttava aine alaosaan. Vastavirtaperiaatteella toimivalla kaasutusprosessilla polttoaineeksi soveltuu vain tasalaatuinen palamainen polttoaine ja siinä palakoko saa olla vain muutamia senttimetrejä. (Karjalainen 2012, 8.)

## 2.5 Pien- ja minivesivoimalaitokset

Vesivoimalaitoksissa sähkö tuotetaan hyödyntämällä kahden eri vesitason välistä korkeuseroa. Voimalaitoksen toiminta on yksinkertaisesti, että virtaavan veden voima pyörittää turbiinia joka taas pyörittää generaattoria, joka muuttaa veden liike-energia lopulta sähköksi. Vesivoima jaotellaan tilastokeskuksen käyttämän kokoluokittelun mukaan seuraavasti:

- suurvesivoimalaitos teho on yli 10 MW
- pienvesivoimalaitos teho on 1-10 MW
- minivesivoimalaitos teho on alle 1 MW

Hajautettuna energiantuotantona voidaan pitää pien- ja minivesivoimalaitoksia. Sähkön tuotanto vesivoimalla edellyttää eri viranomaisilta saatavia lupia. Pienvesivoimalan toiminta edellyttää vesilain mukaista lupaa, jonka myöntää alueen ympäristölupavirasto. Kuviossa 11 on kuvattuna vesiluvan hankintaprosessin kulukaavio. (Pienvesivoimayhdistys ry 2017.)

Pienvesivoimaa on hyödynnetty Suomessa pitkään ja puolet nykyisistä laitoksista on jo yli 50 vuotta vanhoja. Vanhemmilla laitoksilla on usein voimassa oleva lupa, jossa sovelletaan sen rakentamisen aikaista vesilakia, ilman lakiin tehtyjä lisäyksiä. Tästä johtuu, että jos vanhoja laitoksia halutaan kehittää, niin usein edellytetään vesiluvan uusimista ja toimimista vesilain nykyisten säädösten mukaisesti. Tämä voi tuoda laitokselle uusia velvoitteita, kuten esimerkiksi kalatien rakentamisen ja näin ollen lykätä voimalaitoksen kehittämistä. Hyvällä suunnittelulla ja saneeraamalla vanha voimalaitos nykytekniikalle, voidaan vanhojen laitoksien hyötysuhdetta nostaa monella eri tavalla, esimerkiksi vaihtamalla turbiinin juoksupyörä nykyteknologian mukaisesti muotoiltuun. Tällä investoinnilla parannetaan turbiinin hyötysuhdetta ja mahdollistetaan suurempi virtaaman, joka puolestaan mahdollistaa huomattavan tehon noston. (Pienvesivoimayhdistys ry 2017.)

Nykyisin pienvesivoiman lisärakentaminen on haasteellista, koska koskiensuojelulaissa on tarkkaan määritelty ne vesistöt tai jokijaksot, joihin ei saa rakentaa lisää vesivoimaa. Investoinnit vesivoimalaitoksiin ovat kalliita ja edellyttävät pitkää sitoutumista, koska takaisinmaksuajat nykyisillä sähköhinnoilla ovat pitkät. (Pienvesivoimayhdistys ry 2017.)

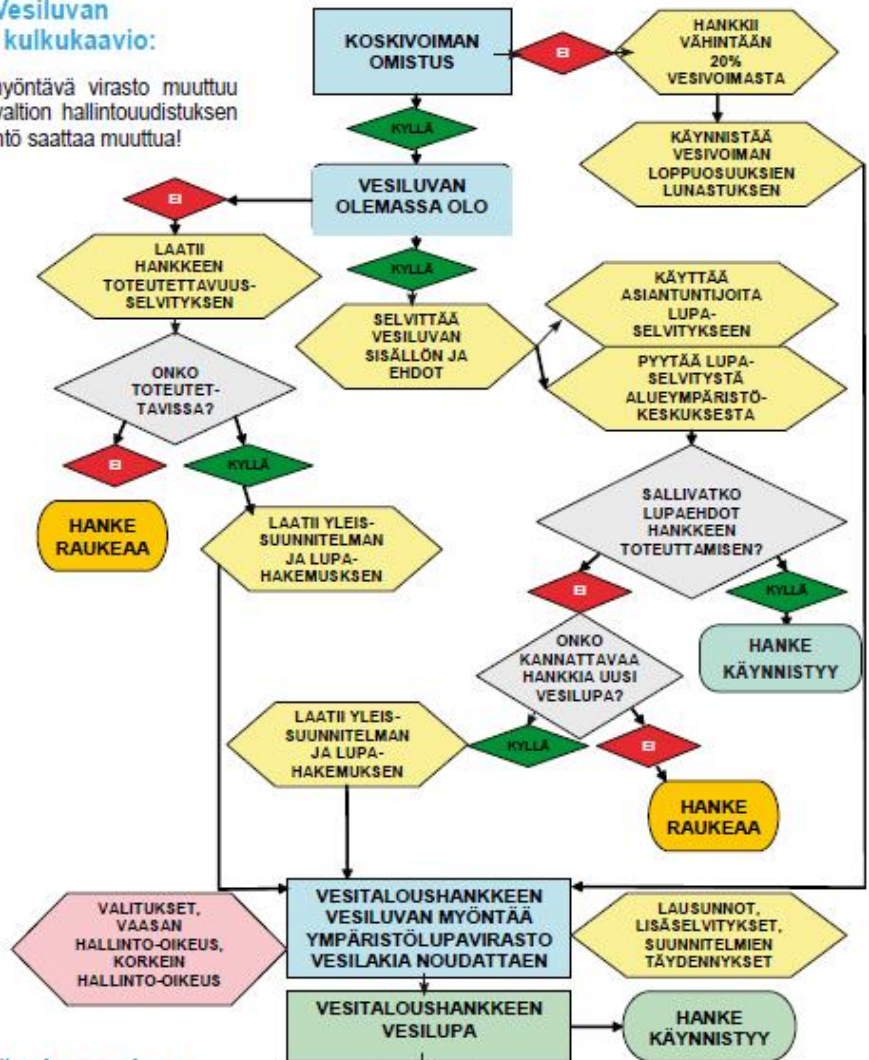
Jos ei rakenneta uutta, voidaan aina korjata vanhaa. Pienvesivoimayhdistys selvitti, että maassamme on huomattava määrä voimalaitoksia, joiden käyttämiselle on nykyään oleellisesti paremmat edellytykset kuin niiden tuotannon lopettamisen aikana. Parantuneiksi edellytyksiksi Pienvesivoimayhdistys listaa:

- vesivoimakoneistoteknologia tarjoaa korkealaatuisia ratkaisuja
- Tuotannolliset edellytykset ovat automaatio- ja kaukokäyttötekniikan myötä parantuneet
- Taajuusmuuntajan käyttö tarjoaa turbiinien elektronisen säätömahdollisuuden, jonka avulla voidaan hienosäätää turbiinin kierroslukua ja parantaa hyötysuhdetta sekä muutenkin säätää turbiinin ominaisuuksia
- Kestomagneettigeneraattorin avulla voidaan hyödyntää alhaisempia kierroslukuja perinteisiin generaattoreihin nähden ja saada generaattori toimimaan paremmilla hyötysuhteilla osakuormituksen aikana
- Sähkömarkkinalainsäädännön pohjalta on verkkoon liittyminen varmistettu ja energian siirtomaksu kohtuullistettu

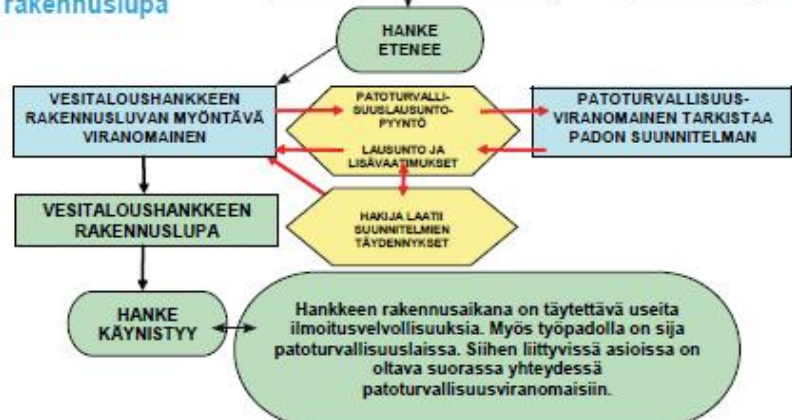
(Pienvesivoimayhdistys ry 2017.)

### Pienvesivoimalan Vesiluvan hankintaprosessin kulkukaavio:

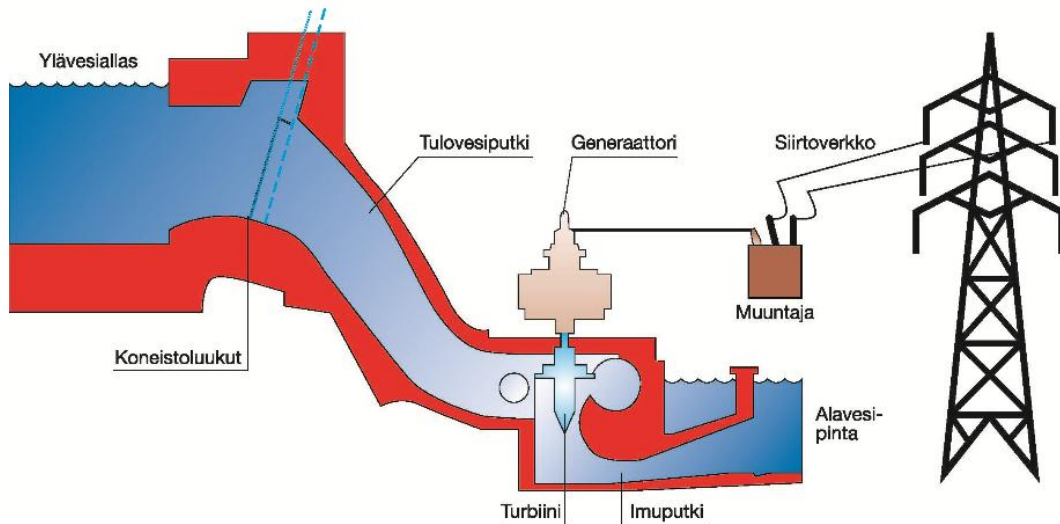
Huomioon: vesiluvan myöntävä virasto muuttuu vuodesta 2010 alkaen valtion hallintouudistuksen yhteydessä. Myös käytäntö saattaa muuttua!



### Vesiluvan sisältämä rakennuslupa ja patoturvallisuus



Kuvio 11. Pienvesivoimalan vesiluvan hankintaprosessin kulkukaavio. (Pienvesivoimayhdistys ry 2017.)



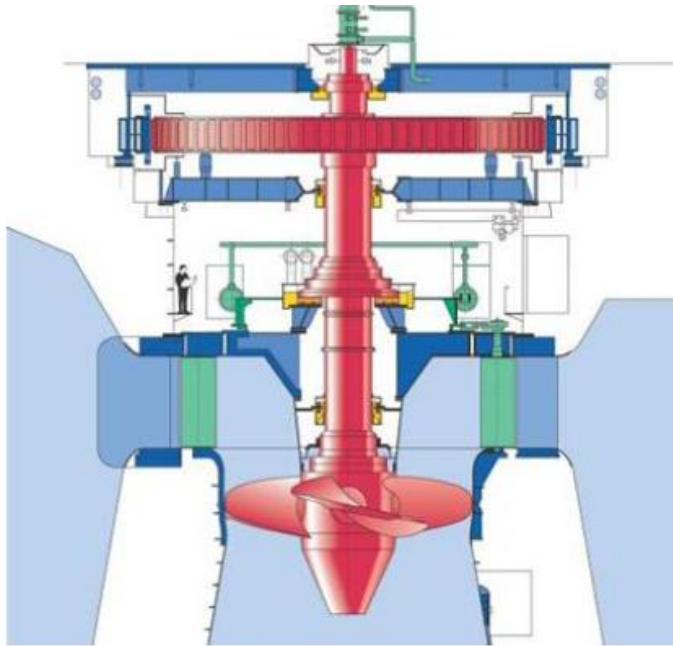
Kuvio 12. Vesivoimalaitoksen periaate. (Energiateollisuus 2017.)

Vesivoimalaitoksen turbiinit voidaan jakaa kahteen ryhmään, ylipaine- ja suihkuturbiineihin. Ylipaineturbiineja ovat Kaplan-, Francis-, potkuri- ja putkiturbiinit ja suihkuturbiineihin kuuluu Pelton-turbiini. Suomessa on kehitetty pienvesivoimakäyttöön soveltuvia turbiineja, kuten kompakti- ja putkiturbiinit, jotka ovat kiinteäsiipisiä ja vakiovesimäärälle tarkoitettuja turbiineja, joilla on yhteinen akseli generaattorin kanssa. (Pienvesivoimayhdistys ry 2017.)

### Kaplan-turbiinit

Kaplan-turbiineilla (Kuvio 13) on laaja hyötysuhdealue, tämä johtuu siitä, että sen tehoa säädetään sekä johtolaitteen johtosolukkeilla että juoksupyörän lapakulmien säädöllä. Näiden kahden säätömahdollisuuden ansiosta saadaan laaja toiminta-alue, ja siksi Kaplan-turbiini soveltuu hyvin Suomen oloihin. (Vieri 2015, 5.) Putouskorkeusskaala on myös laaja ja se voi vaihdella 2 metristä aina 70 metriin. Kaplan-turbiinin rakenne koostuu neljästä tai viidestä säädettävästä siivestä. Turbiinin toiminta perustuu siihen, että virtaavan veden paine muuttuu turbiinin läpi

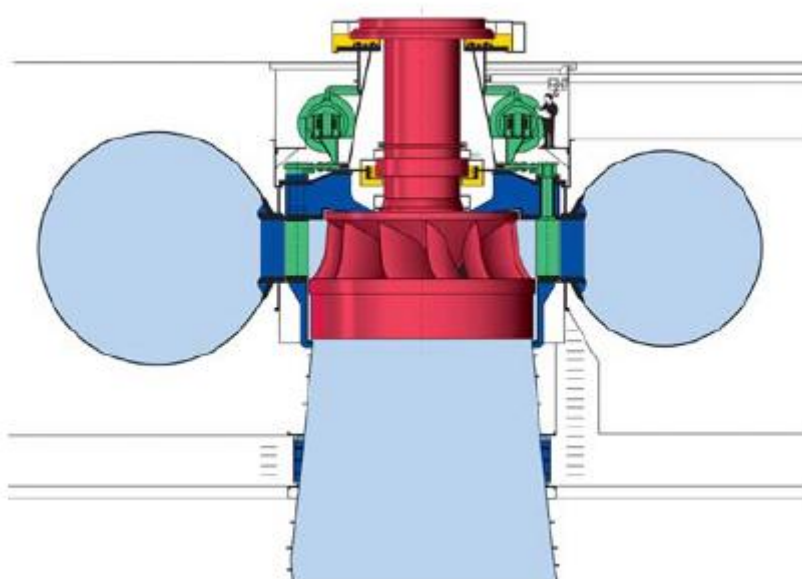
kulkiessa ja vesi luovuttaa energiaa turbiinin siipien liikuttamiseen. (Huhtinen ym. 2011, 269.)



Kuvio 13. Kaplan-turbiini (Vieri 2015, 5)

### Francis-turbiinit

Francis-turbiini (Kuvio 14) on kiinteäsiipinen, yleensä pystyakselille asennettu turbiini, jota voidaan käyttää 5 -700 metrin laajalla putouskorkeusalueella. Turbiinissa on säädettävä johtopyörä, mikä johtuu kiinteäsiipisestä johtopyörästä. Francis-turbiinin vesireitti kulkee turbiinin ulkokehältä sisäkehälle ja vesi poistuu juoksupyörän keskeltä muuttaen samalla painettaan ja luovuttaen energiaansa turbiinin siipien liikuttamiseen. Turbiini ulostulo sijaitsee vedenpinnan alapuolella ja tämän seurauksena imuputkeen syntyy imu, jolla kohennetaan turbiinin tehoa. (Huhtinen ym. 2011, 267-268.)

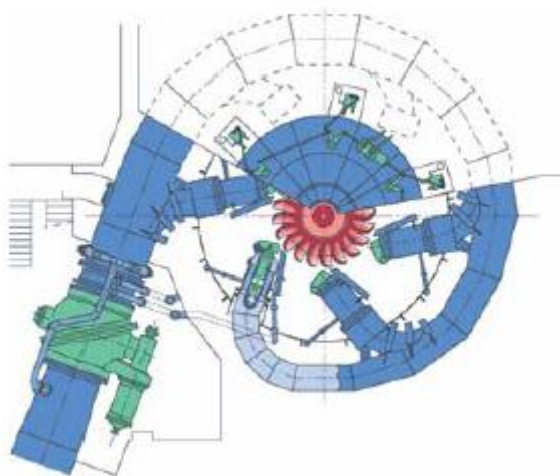


Kuvio 14. Francis-turbiini (Vieri 2015, 4.)

### **Pelton-turbiinit**

Pelton-turbiinit (kuvio 15) ovat vaaka-akselisia aktio-eli tasapaineturbiineja joita käytetään kohteissa, joissa on pieni virtaama ja iso putouskorkeus. Putouskorkeutta vastaava paine-energia muutetaan suuttimen muotoisissa johtolaitteissa kokonaan nopeusenergiaksi. Vesisuihkut kohdistetaan juoksupyörän kauhoihin, jolloin nopeusenergia muuttuu akselia pyörittäväksi momentiksi. Pelton-turbiineissa vettä johdetaan suuttimista vain osalle juoksupyörän kehää, minkä vuoksi ne ovat osittaissyötettyjä turbiineja. (Huhtinen ym. 2011, 267.)





Kuvio 15. Pelton-turbiini (Vieri 2015, 7.)

### 3. Sähkön siirto ja sähkömarkkinat

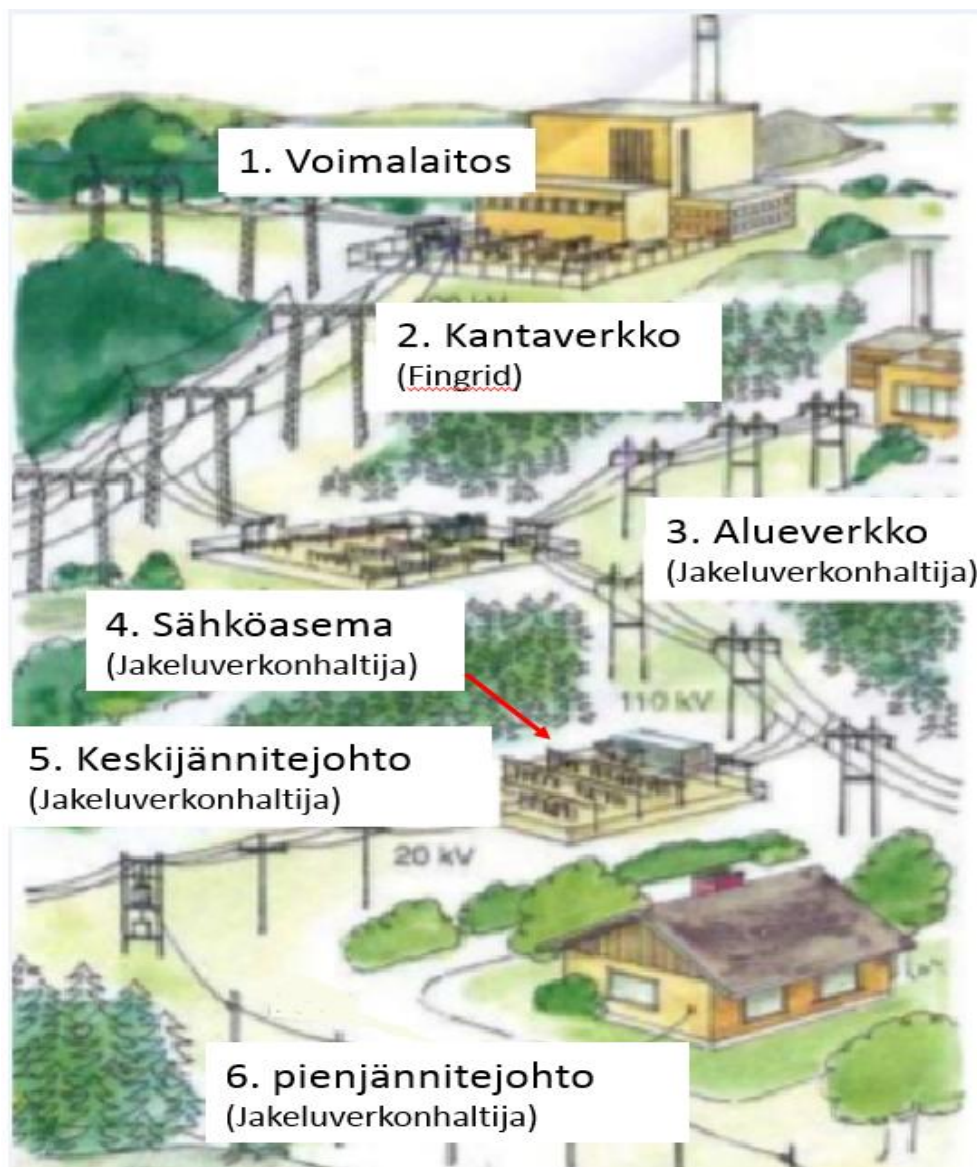
Sähkö hyödykkeenä muodostuu siirtopalvelusta ja sähköenergiasta. Sähköenergian myyntihinnan ja siirtomaksun lisäksi sähkönhintaan lisätään arvonlisävero, sähkövero ja huoltovarmuusmaksu. Suomen voimajärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista sekä sähkön kuluttajista. Se on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Lisäksi Venäjältä ja Viirosta on Suomeen tasasähköyhteydet, joiden kautta pohjoismainen voimajärjestelmä on yhdistetty Venäjän ja Baltian voimajärjestelmiin. Tämän lisäksi yhteispohjoismainen järjestelmällä on tasasähköyhteys myös Keski-Euroopan järjestelmään. Fingridin vastuulla on Suomen kantaverkon valvonta, käytön suunnittelu, tasepalvelu, verkon ylläpito, rakentaminen ja kehittäminen sekä sähkömarkkinoiden toiminnan edistäminen. (Fingrid 2017.)



Kuvio 14. Sähkömarkkinat ja sähkönsiirto.

### 3.1 Sähköverkkotoiminta

Sähköverkkotoiminta edellyttää Energiaviraston myöntämää verkkolupaa. Verkonhaltijoita koskevat verkon ylläpito- ja kehittämisvelvollisuus, sähkönkäyttöpaikkojen ja tuotantolaitosten liittämismvelvollisuus sekä sähkön siirtovelvollisuus. Kyseessä on luonnollinen monopoli ja jakeluverkon haltijan toiminta on tarkoin säännösteltyä. Verkonhaltijat vastaavat sähköverkoston kunnosta ja asiakkaille toimitettavan sähkön laadusta. Jakeluverkonhaltijan verkkolupaan liittyy maantieteellinen vastuualue, jolle alueelle jakeluverkonhaltijalla on yksinoikeus rakentaa jakeluverkkoa. Asiakkaan sijainti jakeluverkonhaltijan vastuualueella ei saa vaikuttaa siirtohintojen suuruuteen. Hinnan on oltava saman suuruinen, sijaitsi kulu- tuspaikka taajamassa tai haja-asutusalueella. Siirtohintaan ei saa myöskään vaikuttaa se, keneltä sähkönmyyjältä asiakas sähkönsä ostaa. Kaikille sähkönmyyjille on oltava tasapuolinen kohtelu. (Energiavirasto 2017.)



Kuvio 15. Suomen voimajärjestelmä. (muunnelma Fingrid)

Isojen teollisten voimalaitosten (1.) sijoituspaikat määräytyvät pitkälti ympäristötekijöiden perusteella, esimerkiksi vesivoimalaitokset on sijoitettava koskien varsille. Josta seuraa, että sähkön tuotanto ja kulutus on yhdistettävä toisiinsa sähköverkolla. Sähköverkot jaetaan käytetyn jännitetason perusteella siirto- tai jakeluverkkoihin. Siirtoverkoiksi luetaan johdot, joiden jännitetaso on 400 kV, 220 kV tai 110 kV. Nämä jännitetasot ovat myös suurjännitteitä. Näistä 400 kV, 220 kV ja tärkeimmät 110 kV johdot sekä sähköasemat muodostavat Suomen kantaverkon (2.), joka yhdistää toisiinsa voimalaitoksia ja syöttöasemia. Kantaverkon omistaa vuonna 1997 perustettu Fingrid Oyj. Yritys syntyi, kun

Imatran Voima Oy, Pohjolan Voima Oy ja Suomen valtio sopivat kantaverkko-liiketoiminnan ja voimansiirtoverkkojen keskittämisestä yhteen yhtiöön. (Fingrid. 2017) Kantaverkkoon kuulumattomat 110 kV:n johdot ja sähköasemat sekä harvinaisemmat 30 kV ja 45 kV johdot muodostavat eri jakeluverkkoyhtiöiden omistamat alueverkot. Alueverkon (3.) kautta siirretään sähköä kantaverkosta jakeluverkkoon. (Korpinen 2008. )

Sähköasemat (4.) muodostavat kanta- ja alueverkkoihin kohtia, joissa jännite muutetaan jakeluverkolle sopivaksi. Sähköasemat koostuvat muuntajista ja muista verkonhallintavälineistä. Näistä tärkeimpiä ovat katkaisijat, joiden tehtävänä on kyetä avautumaan vauroitumatta suurimmallakin vikavirralla, sulkeutumaan sekä johtamaan kuormitusvirran lisäksi oikosulkuvirta. Lisäksi sähköasemilta löytyy erottimia, joiden tehtävä on muodostaa luotettava, näkyvä avausväli erotettavan virtapiirin ja muun laitoksen välille. Siellä on myös mitta-, jännite- ja virtamuuntajia, joiden tehtävä on eristää mittauspiirit suurjännitteisistä päävirtapiiristä. Sähköasemalla on suojarkeitä, jotka ovat mittalaitteiden kaltaisia laitteita. Niiden tehtävänä on tarkkailla verkon sähköisiä suureita ja ne pystyvät havaitsemaan verkon epänormaalit tilat, esimerkiksi ylikuormituksen tai eristyksen pettämisen. Näiden lisäksi sähköasemalla sijaitsee yksi tärkeimmistä järjestelmistä eli apusähköjärjestelmä, jonka tehtävänä on turvata sähköaseman suojaus-, ohjaus- ja valvontajärjestelmiä. Apusähköjärjestelmän on toimittava myös mahdollisten sähkökatkojen aikana, joten sen se on varmennettu akustolla. Varmennukseen voidaan käyttää suljettua tai avointa lyijyakustoa. (Korpinen 2008.)

Sähköasemalta jakeluverkkoa käytetään sähkön siirtoon kulutusalueilla pienille ja keskisuurille sähkökäyttäjille. Jakeluverkot voidaan jakaa edelleen keski- ja pienjänniteverkkoihin. Keski-jänniteverkossa (5.) käytetään Suomessa yleensä 20 kV jännitettä, mutta joissain kaupungeissa käytetään 3 kV, 6 kV tai 10 kV jännitettä. Pienet ja keskisuuret asiakkaat kytkeytyvät jakeluverkkoon pienjänniteverkon kautta. Pienjänniteverkoissa (6.) käytetään 400 V jakelujännitettä. (Korpinen 2008. )

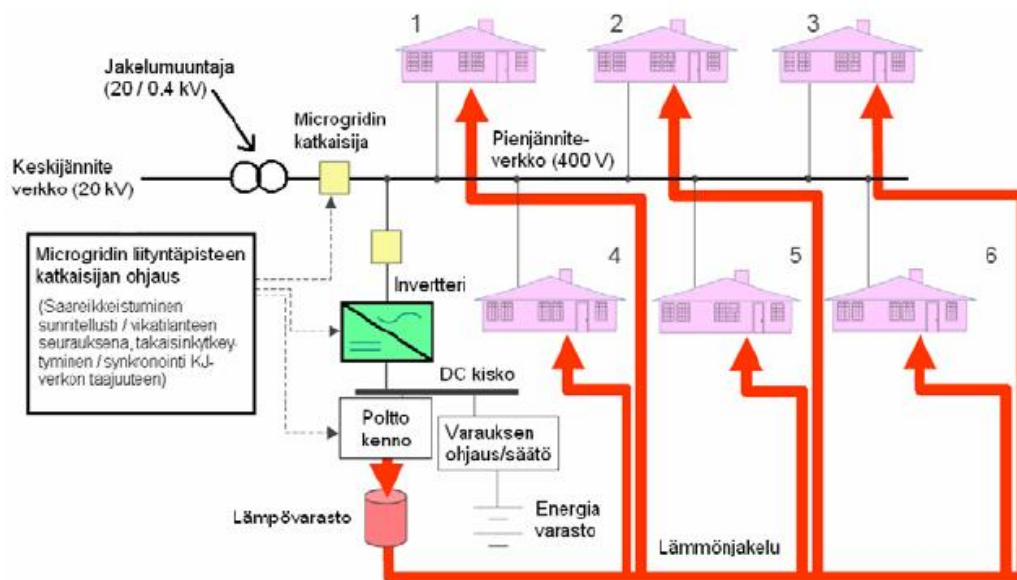
Sähkön laadun ja sähkönjakelun luotettavuuden hallinnan tärkeimmät tehtävät ovat jännitteen stabiilisuuden, jännitteen aaltomuodon ja sähkönjakelun turvaaminen. Jakeluverkossa siirrettävän jakelujännitteen laatu on määritelty SFS-EN 50160 standardissa. Jakeluverkkotoimintaa säätelee sähkömarkkinalaki 588/2013. Laissa käsitellään sähkönlaatua yleisellä tasolla ja siinä määritellään myös virheellisestä sähkötoimituksesta maksettavat korvaukset, kuten esimerkiksi pitkästä sähkökatkoksesta maksettava vakiokorvaus. (Alanen ym. 2008, 13.)

Optimaalinen voimajärjestelmä rakentuu siitä, että erilaisista voimalaitostyyppejä rakennetaan riittävästi niin, että niillä saavutetaan riittävä käyttövarmuus ja samalla minimoidaan tarvittavien investointien kokonaiskustannukset. Toimiakseen sähkömarkkinat tarvitsevat niin pohja-, keski-, huippu- ja varavoimaa. Jos pohjavoiman osuus olisi 55 %, keskivoiman osuus 25 % sekä huippuvoiman osuus 20 % huipputehosta laskettuna, tällöin järjestelmä olisi kustannusten kannalta optimaalinen. (Fingrid 2017.)

Sähkön tuotantojärjestelmän käyttövarmuus edellyttää, että joka hetki pitää varautua yhden suuren yksikön poisputoamiseen verkosta ja sen lisäksi on varauduttava muiden tuotantoyksiköiden samanaikaiseen seisokkiin. Mahdollisissa tehopula tilanteissa Fingrid käynnistää verkko- ja tuotantovikoja varten hankittuja häiriöreservejä esimerkiksi kaasuturbiinivoimaloita korvaamaan puuttuvaa tuotantoa. Mikäli tästä ei ole apua, joudutaan seuraavaksi rajoittamaan sähkön kulutusta. (Fingrid 2017.)

### **3.2 Microgrid**

Poliittiset päätökset ohjaavat sähköntuotantoa tulevaisuudessa uusiutuvan, pienimuotoisen hajautetun sähköntuotannon suuntaan. Microgrid jota voidaan kutsua myös älykkääksi sähköverkoksi yhdistää sähkön tuottajat ja kuluttajat toisiinsa ja sille on tyypillistä tarkasti hallittu, aktiivinen ja monisuuntainen energiavirta. Tuleva visio jakeluverkosta on, että siitä tulee myös keräilyverkko, asiakasvetoinen markkinapaikka hajautetulle energiantuotannolle ja kuluttajille. Mahdollinen hajautetun energiantuotannon lisääntyminen ja sähkönjakelun laadun parantamisen tarve aiheuttavat suuria kehitystarpeita sähköverkkojen ominaisuuksille ja toimivuudelle. (ABB 2017.) Mikäli haluamme hyödyntää hajautetun tuotannon lisääntymisen ja energiavarastojen kehittymisen mahdollistaman sähkönjakelun laadun ja luotettavuuden paranemisen, vaatii se uudenlaisen jakeluverkon rakentamista. Microgrid on tarvittaessa itsenäiseen saarekekäyttöön kykenevä, paikallista tuotantoa ja kulutusta sisältävä jakeluverkon osa johon on mahdollisesti liitetty myös yksi tai useampi energiavarasto. Microgridin myötä on mahdollista toteuttaa ketään syrjimätön hajautettu energijärjestelmä, jossa hyödynnetään pienikokoisia tuotantoyksiköitä, energiavarastoja ja kysynnänjoustoa. Microgrid on tulevaisuudessa itsenäisesti toimiva paikallista verkkoa hallinnoiva verkon- ja energianhallintajärjestelmä, joka mahdollistaa verkon hallinnan esimerkiksi erillisessä saarekekäytössä. (Kumpulainen ym. 2006, 50-51.)



Kuvio 16. Periaatekuviyo yksinkertaisesta microgridistä. (Kumpulainen ym. 2006. 51)

### 3.3 Sähkömarkkinat

Jos sähkösiirto on monopolitoimintaa, niin sähkön tuotanto ja myynti eivät sitä ole. Tehokkaasti toimivat sähkömarkkinat tarvitsevat vapaata kilpailua ja avoimuutta. Suomessa sähkömarkkinat avautuivat vuodesta 1995 vaiheittaen ja vuodesta 1998 myös kotitaloudet ovat voineet kilpailuttaa sähkönmyyjän. Asiakas voi tehdä sähkönmyyntisopimuksen haluamansa sähkönmyyjän kanssa, mutta sähköverkkosopimus eli sopimus sähkönsiirrosta tehdään aina paikallisen sähköverkkoyhtiön kanssa. (Energiateollisuus 2017.)

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla sähkön tuotantotapa valikoituu kysynnän ja tarjonnan perusteella. Sähköntuottajat tuottavat sähköä eri tuotantomuodoilla ja myyvät sen joko sähköpörssiin tai suoraan kahdenkeskisellä kaupalla

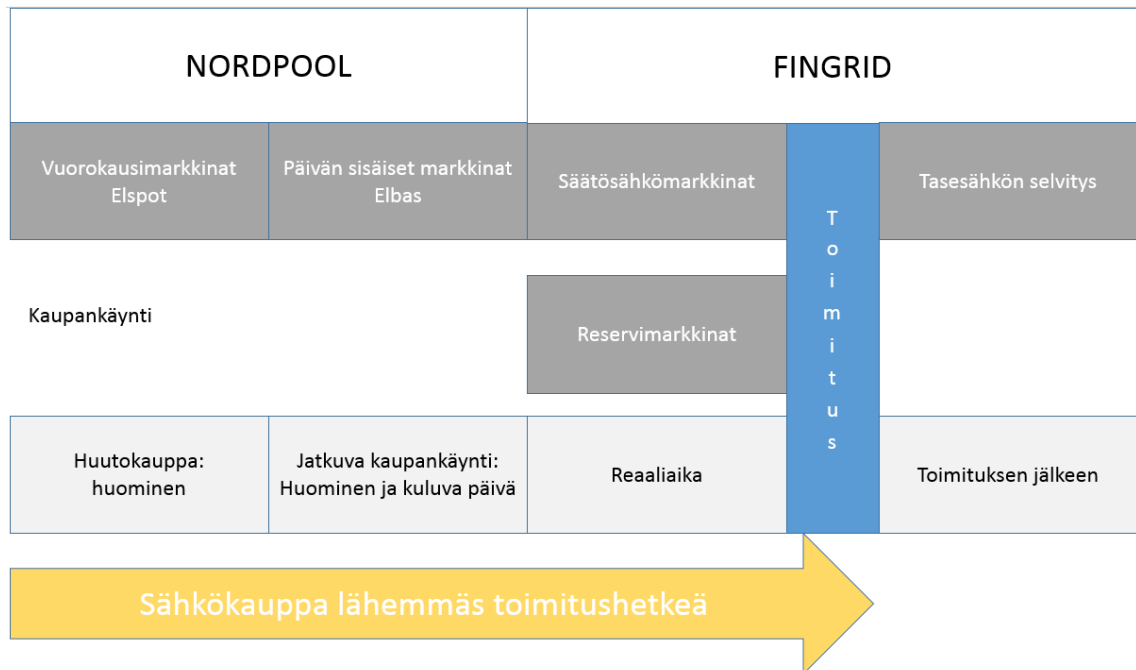
sähkönmyyjille. Sähköpörssissä käydään kauppaa tuottajien ja sähkönmyyjien välillä. Pohjoismaiden sähköstä jo yli 80 % myydään pörssin kautta. Sähkönmyyjät ostavat sähkön joko suoraan tuottajilta kahdenkeskisellä kaupalla tai sähköpörssistä markkinahintaan ja myyvät sen loppukäyttäjille, jotka joutuvat maksamaan käyttämästään sähköstä sähkönmyyjille sekä sähköverkkoyhtiölle sähkönsiirrosta. Kantaverkkoyhtiöiden tehtäviin kuuluu ylläpitää kansallista sähköjärjestelmää sekä siirtoyhteyksiä. Paikalliset sähköverkkoyhtiöt ylläpitävät paikallista siirtoverkkoa, jonka kautta sähkö siirretään loppukäyttäjille. (Energiateollisuus 2017.)



Kuvio 16. Sähkömarkkinoiden rakenne. (Karppanen 2010.)



Sähkön suuret kuluttaja- ja välittäjäyhtiöt sekä sähkön tuottajat käyvät yleensä kauppaa sähkön tukkumarkkinoilla. Pohjoismaiden yhteinen sähkön tukkumarkkina paikka on NordPool – sähköpörssi ja siellä voi käydä kauppaa eri markkinoilla. Elspot vuorokausimarkkina (day-ahead market) on keskeisin markkina. Siellä käydään päivittäin kauppaa seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille, jotta saadaan tarvittava sähköntuotanto vastaamaan kysynnän tarpeisiin. Kun Elspot vuorokausimarkkinat ovat sulkeutuneet, alkaa kaupan käynti Elbas-markkinoilla (intra-day market). Elbas-markkinoilla kauppaa käydään sähkön toimituksista vuoden jokaisena päivänä ympärivuorokautisesti ja kaupankäynti loppuu tuntia ennen varsinaista toimitusaikaa asti. Mikäli on tarve käydä kauppaa sähköntoimituksista Elspot-markkinoiden sulkeuduttua esimerkiksi muuttuneen markkinatilanteen takia, niin sähköntarve voidaan tasoittaa Elbas-markkinoilla. Yleensä tuotanto ja kulutus saadaan tasapainotettua Elspot-markkinoilla. Sähkötoimituksen määrä saattaa muuttua merkittävästi odottamattomien tapausten vuoksi kuten esimerkiksi, jos paljon tuulivoimaa poistuu markkinoilta tuuliolosuhteiden tynnyttyä tai iso ydinvoimalaitos joudutaan ajamaan alas. Edellä mainittujen tilanteiden hallinta hoidetaan Elbas-markkinoilla. Elbas-markkinoiden jälkeen tulee kansallisten kantaverkkoyhtiöiden, kuten Fingridin hallinnoimat säätösähkö- ja reservimarkkinat, joiden tarkoituksena on ylläpitää tehoa ja tasata yllättäviä kysyntätilanteita. (Ollikka 2017.)



Kuvio 17. Sähkömarkkinoiden rakenne. (Muunnelma Fingrid 2017)

#### 4. Lainsäädäntö pienimuotoisesta sähköntuotannosta

Tässä luvussa käsitellään sähkön pientuotantoa koskevaa lainsäädäntöä ja muita määräyksiä. Sähkön pientuotantoa ovat lain määritelmän mukaan kaikki teholtaan enintään 2 MVA:n tuotantolaitteistot ja mikrotuotantolaitosten osalta tehoraja on yleisesti 100 kVA.

- tarvittavat luvat
- tuet
- verotus
- verkkoon liittämisen vaatimukset ja käytännöt
- sähkön myynti ja veloitteet sähkömarkkinoilla

#### 4.1 Tarvittavat luvat

Voimalaitoksen rakentamiseen tarvitaan lupa viranomaiselta ja laitoksen koosta riippuen on tehtävä ilmoitukset Energiavirastolle, verottajalle ja Fingridille. Pienvoimalaitoksen rakentamishankkeessa tulee ensimmäisenä varmistaa, ettei suunnitellun rakentamispaikan kaava estä rakentamista. Pienvoimalaitoksen rakentamiseen tarvitaan kunnan/kaupungin rakennus- tai toimenpidelupa ja mikäli kysymyksessä on pienvesivoimalaitos myös vesilupa. Joissakin tapauksissa voidaan vaatia myös ympäristölupa tai ympäristövaikutusten arviointi. Tällainen vaaditaan esimerkiksi silloin, kun kysymyksessä on ammattimaisesti tai laitospäisesti jätteestä tuotettu biokaasu. Lupamenettelyissä on vaihtelua kunnittain, siksi rakennuslupa ja ympäristölupa kysymyksissä kannattaa olla yhteydessä sijaintikunnan rakennusviranomaiseen. (Motiva 2012, 12.)

#### 4.2 Tuet

Yritykset ja yhteisöt voivat hakea Tekesiltä energiatukea sellaisiin ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointi- ja selvityshankkeisiin, jotka edistävät:

- uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä
- energiansäästöä tai energian tuotannon tai käytön tehostamista
- vähentävät energian tuotannon tai käytön ympäristöhaittoja

(Tekes. 2017)

Maatalousyrittäjät voivat hakea investointitukea maatalan energiantuotannossa tarvittavaan rakentamisinvestointeihin. Investointi on tukikelpoinen vain siltä osin kuin energia käytetään maatalouden tuotantotoiminnassa. Tuen myöntämisen edellytyksenä lisäksi on, että polttoaineena hyödynnetään uusiutuvaa energia-lähdettä. (Mavi 2017.)

Tuotantotukea maksetaan myös niin sanottuna syöttötariffina, tämän tarkoituk-sena on lisätä uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantokapasiteettia. Syöttötariffilla myös parannetaan metsähakkeen kilpailukykyä vaihtoehtoisiin polttoaineisiin verrattuna. Syöttötariffilla tuetaan sähkön tuotantoa joka perustuu tuulivoimaan, metsähakkeeseen, biokaasuun ja puupolttoaineeseen. Tukea mak-setaan laissa määritellyn tavoitehinnan ja sähkön markkinahinnan erotuksena tai päästöoikeuden markkinahinnan sekä turpeen veron perusteella. (Energiavirasto 2017.)

Saksassa ja monessa muussa EU-maassa on kantaverkkoyhtiölle tai jakeluver-konhaltijalle määrätty ostovelvoite verkkoon tuotetusta sähköstä. Mallissa säh-köntuottaja saa tuottamastaan sähköstä kiinteän hinnan ja verkonhaltijalle mak-setaan kiinteän hinnan ja sähkön myynnistä saadun tulon erotus sekä järjestelyistä koituvat kulut. Kaikki tästä koituvat kulut katetaan sähkönkäyttäjiltä perittäville maksuilla. Tällainen järjestelmä lisäisi kiinnostusta hajautettua tuotan-toa kohtaa, sillä se siirtää sähkön myyntiin liittyvät riskit pois tuottajalta. (Salo 2015, 18).

### 4.3 Verotus

Suomessa sähköveroa maksavat sähköntuottajat ja verkonhaltijat, joiden on rekisteröidyttävä Verohallinnolle. Sähkön ostajat, myyjät tai maahantuojat eivät yleensä ole verovelvollisia, elleivät ole myös sähköntuottajia tai verkonhaltijoita. (Vero 2017.)

Pienimmät sähköntuottajat eli enintään 100 kVA:n nimellistehoilla mikrovoimalaitoksilla sähköä tuottavat on kuitenkin vapautettu kaikista sähköverotuksen velvollisuuksista. Näiden toimijoiden ei tarvitse rekisteröityä verovelvollisiksi eikä antaa sähköntuotannostaan veroilmoituksia. Tätä suuremmat yli 100 kVA:n nimellistehoiset, mutta enintään 800 000 kWh vuodessa tuottavat sähkön pien-tuottajat joutuvat sen sijaan rekisteröitymään Verohallinnolle sähköverovelvollisiksi säädetyn vuosituotantorajan valvonnan vuoksi ja niiden on myös tehtävä veroilmoitus vuosittain. (Vero 2017.)

### 4.4 Sähköverkkoon liittyminen

Sähkömarkkinalain 588/2013 20§ mukaan:

*Verkonhaltijan tulee pyynnöstä ja kohtuullista korvausta vastaan liittää sähköverkkonsa tekniset vaatimukset täyttävät sähkönkäyttöpai-  
kat ja voimalaitokset omalla toiminta-alueella. Liittämisehtojen ja tek-  
nisten vaatimusten tulee olla tasapuolisia kaikille liittyjille ja niissä on  
otettava huomioon sähköjärjestelmän toimintavarmuus ja tehokkuus.  
Verkonhaltijalla on velvollisuus julkaista liittämistä koskevat tekniset  
vaatimukset. Liittämistä koskevat tarjouspyynnöt on käsiteltävä koh-  
tuullisessa ajassa ja verkonhaltijan tulee antaa kattava ja riittävän  
yksityiskohtainen arvio liittymiskustannuksista sekä toimitusajasta.*

Verkonhaltijaan kannattaa olla yhteydessä jo ennen tuotantolaitoksen hankkimispäätöstä, jotta voidaan varmistua tuotantolaitoksen soveltuvuudesta liittämiskaan ja verkkonhaltija pystyy toteuttamaan mahdolliset muutokset jakeluverkkoon. Ennen tuotantolaitoksen käyttöönottoa tulee solmia sähköverkonhaltijan kanssa tuotantoa koskeva verkkopalvelusopimus ja tuotannon liittymissopimus. Tuotantolaitoksen tulee täyttää sille määrätty tekniset turvallisuusvaatimukset eikä tuotantolaitos saa aiheuttaa häiriöitä muille sähköverkon käyttäjille. Voimalaitoksen koko määrittää onko laitos mahdollista kytkeä verkkoon, joko kiinteistön tai kiinteistöryhmän kanssa yhteisen liittymäpisteen kautta vai omana liittymispisteenä. Tuotantolaitosta liitettäessä yleiseen sähköjakeluverkkoon tulee teknisissä ratkaisuisissa huomioida ennen kaikkea turvallisuus sekä kustannukset. Monilla verkko-yhtiöillä tuotantolaitteiston liittämisen vähimmäisvaatimuksena on, että sen on täytettävä Energiategollisuus ry:n suosituksen tekniset vaatimukset, saksalaisen vaatimusdokumentin VDE-AR-N 4105:2011-08 suojaustekniset vaatimukset tai mikrotoisantostandardin EN50438 vaatimukset Suomen asetusarvoilla. (Energiategollisuus 2017.)

Voimalaitoksesta, jonka koko on enintään 50 kVA:ta, tulee toimittaa ainakin seuraavat tiedot paikalliselle jakeluverkonhaltijalle:

- laitoksen tyyppi, nimellisteho ja nimellisvirta
- liitäntälaitteen tyyppitiedot
- suojauksen asetteluarvot ja toiminta-ajat
- tiedot saarekekäytön estosuojausten toteutuksesta

Voimalaitoksesta, jonka koko on yli 50 kVA:ta, tulee toimittaa jakeluverkonhaltijalle yleiset ja sähkötekniset tiedot dokumentoituna. Yleisesti vaaditaan seuraavia tietoja:

- voimalaitoksen rakenne ja sijainti
- voimalaitoksen muuntajan/muuntajien tekniset tiedot
- voimalaitoksen generaattorin tekniset tiedot
  - lukumäärä

- toimittaja
- tyyppi
- nimellisarvot
- tuotantotehon riippuvuus käyttöolosuhteista
- taajuuden ja loistehon säädössä käytettävät laitteet
- voimalaitoksen suojaustiedot
- käyttöönottodokumentit sekä muu dokumentaatio

(Motiva 2012, 19-20.)

Nimellisteholtaan enintään 100 kVA sähköntuotantolaitos voidaan liittää kohteen etäluettavaan mittariin, jos se mittaa erikseen sähköverkosta otetun ja siihen syötetyn energian. Verkosta ottoa ja antoa ei vielä netoteta, vaan mittalaitteessa on oltava näille erilliset rekisterit. Netottamisella tarkoitetaan verkkoon siirretyn energian vähentämistä suoraan verkosta otetusta energiasta. (Energiateollisuus 2017.)

Jos tuotantolaitos on nimellisteholtaan yli 100 kVA, tulee tuotantolaitos varustaa erillisellä mittauksella, jonka avulla voidaan laskea oman tuotannon kulutus. Oman tuotannon kulutukseksi katsotaan tuotantolaitoksessa tuotettu energia, joka käytetään suoraan kohteessa. Oman tuotannon kulutus saadaan laskettua, kun vähennetään tuotetusta sähköstä tuotantolaitoksen omakäyttösähkö ja verkkoon syötetty sähkö. Yli 100 kVA tehoisilla tuotantolaitoksella tuotetusta tuotantokohteessa itse kulutetusta sähköstä on maksettava sähkövero, mikäli tuotantolaitoksen vuosituotanto ylittää 800 000 kWh. Verkonhaltijan vastuulle kuuluu verkosta oton ja verkkoon annon mittaaminen. Mittarin omistaa verkonhaltija joka huolehtii myös sen luennasta, kun taas oman tuotannon kulutuksen mittaamisvastuu on sähkön tuottajalla. (Energiateollisuus 2017.)

Taulukko 2. Sähköverkkoon liittymiseen tarvittavat sopimukset ja sopimusosapuolet. (Energiateollisuus. 2017)

Lupa/Sopimus ja sopijaosapuoli	Sisältö	Huomautukset
Liittymissopimus/ Jakeluverkkoyhtiö	Sovitaan liittämiskohdasta, liittymismaksusta, sähköntuotantolaitteistolle asetettavista vaatimuksista, sähköntuotantolaitteiston käytöstä ja suojauksesta, teho- ja energia-arvojen rajoista jne.	Jakeluverkonhaltijoiden hinnoittelumenetelmien on perustuttava Energiamarkkinaviraston määrittämiin sääntöihin.
Verkkopalvelusopimus/ Jakeluverkonhaltija	Verkkosopimuksen tehnyt voimalaitos saa toimia rinnan jakeluverkon kanssa. Sopimuksessa käsitellään mm. mittauksen järjestämistä, kustannusten korvaamista ja sähköturvallisuutta, suojausta ja sähkön laadun turvaamista. Verkkopalvelusopimus voidaan tehdä, kun kyseistä sähköntuotantopaikkaa koskeva liittymissopimus on voimassa.	Sopijapuolten välinen verkkosopimus voi myös kattaa sähköntuottajan sähkönhankinnan.
Sähkönmyyntisopimus/ Sähkön ostaja	Sähköntuottaja sopii tuottamansa sähköenergian myynnistä muun muassa seuraavaa: <ul style="list-style-type: none"> <li>• sähkön hinta</li> <li>• toimituksen määrä</li> <li>• tasesähkö</li> </ul>	Sähköntuottajan ja myyjän tulee myös sopia miten tasehallinta hoidetaan.

#### 4.5 Sähkönmyynti

Kaikelle jakeluverkkoon tuotetulle sähkölle pitää olla ostaja, sähköntuottaja voi myydä sähkön joko sähköpörssin kautta tai kahdenvälisenä kauppana. Tosin sähköpörssissä kauppaa voivat käydä vain sen jäsenet ja yleensä pienen volyymin kaupat käydään kahdenvälisinä. Sähköntuottaja voi toki myydä sähköä sähköpörssikauppaa käyvälle sähköyhtiölle tai sähkömarkkinameklarille. Jokaisella jakeluverkkoon sähköä siirtävällä sähköntuottajalla on oltava myös avoin sähköntoimittaja. Avoimella toimituksella tarkoitetaan Valtionneuvoston asetuksen sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta 31.3.2016/217 1 luvun 1§ seuraavaa:



*avoimella toimituksella sähkötoimitusta, jossa sähkötoimittaja toimittaa asiakkaalleen kaiken tämän tarvitseman sähkön, sekä sähkötoimitusta, jossa sähkötoimittaja tasapainottaa asiakkaan sähköntuotannon ja -hankinnan sekä sähkönkäytön ja -toimituksen erotuksen toimittamalla puuttuvan sähkömäärän tai vastaanottamalla ylijäämän kunkin tasatunnin aikana.*

Sähköntuottajan on huolehdittava myös sähkötaseestaan, eli ylläpidettävä sähkön tuotannon/hankinnan ja kulutuksen/myynnin välistä tehotasapainoa. Sähkömarkkinoiden osapuolet ovat harvoin keskenään kykeneviä tasapainottamaan sähkötasetta, siksi tarvitaan lähes aina myös avoin toimittaja. Avoimella toimittajalla on oltava tasevastaava, jonka taseessa sähköntuottajalta ostettu sähkö käsitellään. Jakeluverkonhaltija ei voi ostaa sähköä, koska heillä on sallittua ostaa ainoastaan häviösähköä ja senkin hankinta on kilpailutettava. (Motiva 2012, 26.)

Sähköntuottajalle kuuluvat myös tasesähköön liittyvät sähkömarkkinavelvoitteet. Fingrid edellyttää, että sille toimitetaan päivittäin tuntikohtaiset tuotantosuunnitelmat, joihin on liitetty kyseisen tasevastaavan tuotantotaseeseen kuuluvat vähintään 1 MVA:n voimalaitokset. Tätä pienemmät eli alle 1 MVA:n voimalaitokset voidaan käsitellä kulutustaseessa, eli sähkön ostaja voi netottaa tuotannon taseeseensa kuuluvan kulutuksen kanssa. Sähköntuottaja voi hoitaa tasesähköön liittyvät velvoitteet itse tai ostaa palveluna esimerkiksi sähkön ostajalta. (Motiva 2012, 26.)

## 5. Hajautetun tuotannon vaikutukset sähköjakeluverkossa

Laajasti käyttöön otettu hajautettu tuotanto muuttaa perinteisesti keskitettyyn sähköntuotantoon perustuneen, passiivisen, yhdestä suunnasta syötetyn jakeluverkon aktiiviseksi, monesta pisteestä syötetyksi. Haasteita tuo jännitteen hallinnan ohella suojauskysymykset. Tulevaisuuden sähköjakeluverkoilta edellytetään sähkömarkkinalakiin kirjoitettuna olennaisesti parempaan luotettavuutta, kuin mihin nykyverkolla päästään. Jotta verkkojen luotettavuus paranisi edellyttää se investointeja, mutta samanaikaisesti verkkoliiketoimintaan kohdistuu kustannustehokkuusvaatimuksia. Tulevaisuuteen liittyy suuria epävarmuustekijöitä, kuten hajautetun sähköntuotannon todennäköinen voimakas yleistyminen. Tämä asettaa verkoille vaatimuksen joustavuudesta. (Kumpulainen 2006, 77.)

### 5.1 Yleistä

Perusvaatimus tuotantolaitosta liitettäessä yleiseen sähköverkkoon ja käytettäessä sitä rinnan yleisen sähköverkon kanssa on, että tuotantolaitos on turvallinen eikä siitä aiheudu häiriöitä verkkoon eikä se myöskään riko muiden sähkökäyttäjien sähkölaitteita. Tuotantolaitteistoiksi luetaan pyörivien generaattoreiden lisäksi myös erilaiset staattiset sähköjakeluverkkoon sähköä syöttävät laitteistot, kuten suuntaajalaittein sähköverkkoon liitetyt akustot, valosähköiset kennot, polttokennolaitokset jne. (Energiateollisuus 2009.)

Tuotantolaitos tulee suunnitella ja rakentaa niin, että laitoksen kytkeytyminen yleiseen jakeluverkkoon on estetty, ellei jakeluverkon jännite ja taajuus ole sovittujen asettelurajojen sisäpuolella. Tuotantolaitoksen tulee myös kytkeytyä irti jakeluverkosta, mikäli verkkoa ei syötetä muualta. Kun verkkojännite palautuu, voidaan

laitos kytkeä verkkoon automaattisesti tai se voidaan kytkeä käsin takaisin verkkoon, verkonhaltijan kanssa tehdyn sopimuksen mukaisesti. (Energiateollisuus 2009.)

Suuremmat tuotantolaitokset (yli 500 kVA) vaikuttavat jo merkittävästi koko paikallisen sähköverkon rakenteeseen ja niiden merkitys koko voimajärjestelmän kannalta korostuu voimakkaasti laitosten määrän kasvaessa. Suurempien laitosten kohdalla on myös tärkeää, että laitokset kykenevät toimimaan myös verkon jännitteen ja taajuuden vaihdellessa. Tämä on tärkeää siksi, että niillä pystytään tarvittaessa tukemaan voimajärjestelmän toimintaa mahdollisten häiriöiden aikana sekä välittömästi sen jälkeen. Verkonhallinnan kannalta olisi toivottavaa, jotta tuotantolaitteiston haltija toimisivat yhteistyössä ja varustaisivat ainakin suurimmat voimalaitokset kaukokäyttö-järjestelmällä, jota hyödyntäen verkonhaltija voisi tarvittaessa ohjata voimalaitoksen toimintaa. (Energiateollisuus 2009.)

Mikäli verkon kanssa rinnankäyvää tuotantolaitosta halutaan käyttää myös varavoimana sähkökatkoissa, tulee järjestelmä rakentaa niin, että siinä on kaksoiskytkentämahdollisuus. Siinä tuotantolaitos toimii toisella kytkennällä verkon kanssa rinnan ja toisella kytkennällä täysin verkosta erotetussa saarekkeessa. Sähköverkon ollessa jännitteetön, ei saarekekäytössä oleva laitos saa olla yhteydessä sähköverkkoon. Tämä on ehdottoman välttämätöntä verkon viankorjaus- ja asennustöiden turvallisuuden takia. (Energiateollisuus 2009.)

## 5.2 Tuotantolaitoksien luokittelu

Monet tuotantolaitoksen ominaisuudet vaikuttavat sen toimintaan sähköverkossa. Tuotantolaitoksen nimellisteho on yksi merkittävä asia, mutta myös muut ominaisuudet ovat verkon käytön kannalta olennaisia. Sähköjakeluverkkoon liitettävät tuotantolaitteistot voidaan jakaa toimintaperiaatteidensa mukaisesti eri luokkiin, nämä on esitelty taulukossa 3. Kyseessä on Helen Sähköverkon ohjeistus, joka on kattavimpia mitä voimalaitoksien liittämisestä sähköverkkoon on tehty. Tuotantolaitteiston ja syöttävän verkon suojausten koordinointi edellyttää aina tapauskohtaista tarkastelua ja vaatii ammattitaitoa. Nämä tarkastelut sisältävät esimerkiksi sähköaseman johtolähtöjen ylivirtasuojien asettelujen koordinoinnin, maasulkusuojauksen oikean toiminnan varmistamisen sekä sähköaseman kiskosuojauksen toiminnan varmistamisen ja pikajälleenkytkennän käytön tarkastelun sekä myös Fingridin esittämien järjestelmätekniisten vaatimusten soveltamisen. Tuotantolaitoksen sovellettavat ratkaisut riippuvat sen koosta, tyypistä ja sijainnista verkossa. (Helen Sähköverkko Oy 2009.)

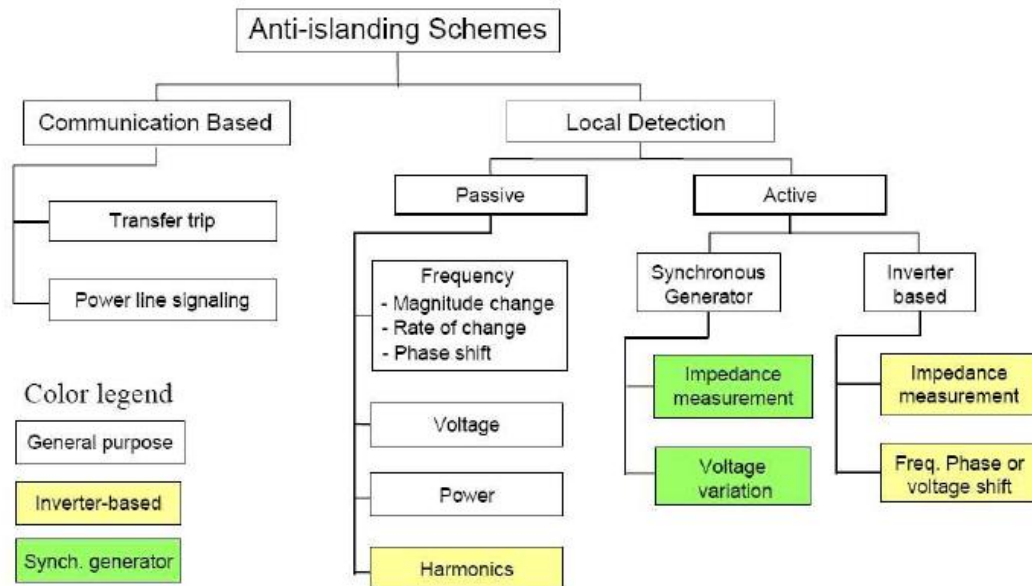
Taulukko 3. Tuotantolaitteistojen luokittelu toimintaperiaatteiden mukaisesti. (Helen Sähköverkko Oy. 2009)

		Luokka	Rinnan- käynnin esto	Tahdistus	Yhteenso- pivuuseh- dot	Yksin- syötön esto	Sopi- musehdot	
Yleisestä jakeluverkosta erossa käyvät tuotantolait- teistot	Rinnankäyttö estetty mekaanisel- la kytkimellä	Lk 1.	■	-	-	-	LE2014 VPE2014	
	Rinnankäyttö rajoitettu automaat- tisella syötönvaihdolla (kork. 5 s)	Lk 2.	■	■	-	-	LE2014 VPE2014	
Yleisen jake- luverkon kanssa rin- nankäyvät tuotantolait- teistot	Sähkön siirto jakeluverkkoon estetty	Lk 3a.	-	■	■	■	LE2014 VPE2014	
	Sähkön siirto jakeluverk- koon sallittu	Tuottaja myy sähköä muulle sähkökaupan osapuolelle (laitteistot <50kVA)	Lk 3b.	-	■	■	■	TLE2014 TVPE11
		Tuottaja myy sähköä muulle sähkökaupan markkinaosapu- olelle	Lk 4.	-	■	■	■	TLE2014 TVPE11

LE2014 = yleiset liittämisehdot (sähkökäyttäjille) vuodelta 2014  
VPE2014 = yleiset verkkopalveluehdot (sähkökäyttäjille) vuodelta 2014  
TLE2014 = sähköntuotannon liittämisehdot vuodelta 2014  
TVPE11 = liite verkkopalveluehtoihin koskien sähköntuotannon verkkopal-  
velua vuodelta 2011

### 5.3 Saarekekäytön esto

Saareketilanteen estämiseen tarkoitettu suojauksesta käytetään Euroopassa yleisesti termiä Loss-of-Mains protection (LoM) ja Amerikassa siitä käytetään termiä anti-islanding. Loss of Main – tilanne syntyy voimalaitoksella silloin, kun jakeluverkko muuttuu jännitteettömäksi. Tällaisessa tilanteessa tuotantolaitos ei välttämättä havaitse verkon alas ajautumista vaan voi jäädä syöttämään saarekettä. LoM-suojausmenetelmät luokitellaan passiivisiin, aktiivisiin ja tietoliikennetähyödyntäviin menetelmiin. Kuviossa 19 on LoM-suojausmenetelmät luokiteltuna. (Kumpulainen ym. 2006, 83.)



Kuvio 19. LoM-suojausmenetelmät. (Kumpulainen ym. 2006, 83.)

Passiivisissa menetelmissä suojalaite tarkkailee verkosta mitattuja suureita esimerkiksi taajuutta, jännitettä, tehoa sekä harmonisia yliaaltoja. Aktiiviset menetelmät ovat monimutkaisempia ja siinä suojalaite diagnosoi järjestelmän vastetta laitteen itse aiheuttamaan muutokseen. Vasteet eroavat toisistaan sen mukaan, onko tuotantoyksikkö kytkettynä verkkoon vai toimiiko se saarekkeessa. Aktiivisiin menetelmiin kuuluu esimerkiksi se, että tuotantoyksikkö injektioi verkkoon pulssin ja vastetta tarkkailemalla yrittää päätellä, onko se kiinni pääverkossa vai ollaanko saareketilassa. Haittapuolena aktiivisessa menetelmässä pidetään sähkön laadun huononemista, sekä useiden tuotantoyksiköiden aktiivisten eroon kytkentä suojausmenetelmien ei-toivottua keskinäistä vuorovaikutusta. (Kumpulainen ym. 2006, 83-84)

LoM-suojauksen iso haaste on saareketilanteen havaitseminen, jossa saarekkeen kulutus ja tuotanto ovat sekä pätö- että loistehon suhteen tasapainossa ja jonka syntymiseen ei liity verkon vikaantumista. Tehotasapainotilanteessa erityisesti passiivisten LoM-menetelmien toimivuudessa havaitaan puutteita. Kumpulainen ja Ristolainen ovat raportissaan listanneet eroonkytkentäsuojauksen menetelmien toimivuutta NDZ-käsitteen (Non Detection Zone) eli katvealueen näkökulmasta, esimerkkeinä heillä oli seuraavat johtopäätökset:

- Kaikki passiiviset menetelmät, jotka perustuvat jännitteen ja taajuuden tai niiden johdannaisten tarkkailuun, voivat pettää.
- On osoitettu kokein, että jokaisella yksittäisellä passiivisella menetelmällä on NDZ eli katvealue suojauksessa.
- NDZ:n lisäksi passiivisten menetelmien huono puoli on tuotantoyksiköiden tarpeeton laukaisu.
- Tehonsuuntareleen avulla on saavutettavissa kattava suojaus, mutta tämä suojaustapa rajoittaa hajautetun tuotannon käyttöaluetta.
- Aktiivisten suojausmenetelmien toiminta voi olla puutteellista, jos hajautettua tuotantoa on useita yksiköitä.
- Vaihtosuuntaajaan perustuvassa hajautetussa tuotannossa olisi parasta käyttää aktiivisia menetelmiä passiivisten sijasta vaihtosuuntaajan dynaamisten ominaisuuksien ja ohjattavuuden vuoksi.

(Kumpulainen ym. 2006, 84.)

Tietoliikenteeseen perustuvat menetelmät ovat ainoita tapoja saavuttaa lähes aukoton LoM-suojaus. Siirtolaukaisussa (transfer trip) tieto lähtee sähköasemalta olevalta katkaisijalta ja tämä edellyttää nopeaa tiedonsiirtoa, mikäli käytössä on pikajälleenkytkennät. Mikäli sähkönjakelu keskeytetään muualta, kuin sähköasemalla sijaitsevalta kytkinlaitteella, niin siirtolaukaisu ei toimi. Mikäli rakennetaan täysin aukotonta LoM-suojausta, tulisi siirtolaukaisu ulottaa kaikkiin tuotantoyksikköön vaikuttaviin kytkinlaitteisiin. Haittapuolina siirtolaukaisussa on kalleuden

lisäksi se, että verkon kytkentätilan muutoksista aiheutuu muutostarvetta siirtolaukaisuille. (Kumpulainen ym. 2006, 105-106.)

Jatkuvuussignaaliin perustuva LoM-suojaus perustuu siihen, että sähköasemalle sijoitetaan lähetin, joka syöttää jatkuvatoimisesti signaalia verkkoon. Tuotantoyksiköillä sijaitsevat vastaanottimet vastaanottavat tiedon verkkoyhteydestä signaalin kautta. Mikäli vastaanotin menettää signaalin, niin tuotantolaitos tulkitsee olevansa saarekkeessa, jonka seurauksena se kytkeytyy irti jakeluverkosta. Toisin kuin siirtolaukaisussa, niin jatkuvuussignaalin perustuva LoM-suojaus toimii vaikka saareke syntyisi lähdön katkaisijan, johdolla sijaitseva kytkinlaitteen tai sulakkeentoimittua. Myöskään verkossa tapahtuvat kytkentätilan muutokset eivät aiheuta muutostarvetta jatkuvuussignaalin perustuvassa LoM-suojauksessa, muussa tapauksessa kuin, jos muutos tapahtuu sähköasemien välillä. (Kumpulainen ym. 2006, 107-108.)

#### **5.4 Saarekekäyttö**

Saarekekäyttöä on Suomessa ollut perinteisesti käytössä vain suurissa teollisuuslaitoksissa sekä katkeamatonta sähkönsyöttöä edellyttävissä kohteissa, kuten esimerkiksi sairaaloissa. Mikäli haluamme hyödyntää hajautettua sähköntuotantoa sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamisessa on tuotantolaitoksen pystyttävä saarekekäyttöön. Edellytys toimivalle saarekekäytölle on se, että kun tuotantolaitoksen suunnitteluvaiheessa huomioidaan mahdollisuus saarekekäyttöön. Lisäksi jakeluverkko on suunniteltava niin, että se mahdollistaa saarekekäytön. Tällöin puhutaan yleisesti microgrid-konseptista.



Microgrid-konseptin perusajatuksena on mahdollistaa hajautettuun tuotantoon perustuvien saarekkeiden käyttömahdollisuus paikallisen käyttövarmuuden parantamiseksi. Ideaalinen microgrid on sellainen, että se pystyy irtautumaan katkottomasti saarekkeeksi pääverkon vikaantuessa ja varmistamaan siihen kytkettyjen kuormitusten sähkösaannin. Tämä on haastavaa, sillä se edellyttää nopeaa tuotannon ja kulutuksen yhteensovittamista. Ongelmallista on myös saarekekäytössä verkon jännitteen ja taajuuden säätö tuotantoyksiköillä tai tuotantoyksiköillä. (Kumpulainen ym. 2006, 80.)

Sähkönjakelunluotettavuuden kannalta mikrogridin tuomiin etuihin kuuluu myös mahdollisuus keskitettyyn eroon kytkentäsuojaukseen edellyttäen, että microgrid on liitetty vain yhdestä liitäntäpisteestä pääverkkoon. Keskijänniteverkkoon ulottuvan mikrogridin tapauksessa muodostuu aliverkkoon oma suojausalue, jonka sisällä tapahtuvat viat hoidetaan itsenäisesti, ilman että pääverkko mainittavasti häiriintyy. (Kumpulainen ym. 2006, 80.)

Saarekkeen ja verkon välisen suojauksen koordinointi on haasteellista, kuten myös saarekkeen sisäinen sähkötekniinen suojaus. Tämä tulee ajankohtaiseksi silloin, kun saarekkeen sähköntuotanto ei perustu tahtigeneraattoreihin tai erityisesti suurivirtaisiksi suunniteltuihin vaihtosuuntaajiin. Tällaisessa tilanteessa saarekkeen vikavirtataso jää huomattavasti verkkoon kytkettyä tilannetta pienemmäksi, jolloin perinteinen sulakkeilla toteutettu ylivirtasuojaus ei tule kysymykseen. Tämän vuoksi saarekekäytössä vian havaitseminen pelkästään perinteisesti virran perusteella ei välttämättä ole toimiva ratkaisu. Ratkaisuna sulakkeen toiminta-ajan pitenemiseen voidaan käyttää esimerkiksi välittömästi generaattorin jälkeen sijoitettavaa välisulaketta, jonka heikkoutena on mahdollinen epäselektiivisyys. Sulakkeiden sijasta on mahdollista käyttää myös relesuojauksia, joka on kustannuksiltaan huomattavasti kalliimpi ja pienjänniteverkossa huomio kiinnittyy erityisesti suojauksen kustannuksiin. (Kumpulainen ym. 2006, 81.)

Siirryttäessä saarekekäyttöön on myös varmistuttava siitä, että saarekeverkon maadoitukset ovat tarkoituksenmukaiset. Maadoitusjärjestelmistä TT ja TN-C-S on todettu soveltuvan parhaiten pj-verkosta muodostuvalle microgridille. VTT:n tekemissä simuloinneissa ja tutkimuksissa on todettu, että invertterin tai taajuusmuuttajan kautta verkkoon liittyvän tuotantoyksikön vian aikaiseen käyttäytymiseen vaikuttavat komponenttien mitoituksen ja suojausjärjestelmien lisäksi myös sen säätöperiaatteet, joissa on vaihtelua valmistajien tai sovelluskohteiden suunnittelutavoitteista johtuen. Kumpulainen ja Ristolainen ovat raportissaan listanneet saarekekäytön teknisiä rajoitteita, jotka ovat:

- saarekekäyttö voi jättää osan verkosta ilman järjestelmän maadoitusta
- saarekkeen vikavirtataso voi olla riittämätön suojalaitteiden toimimiselle
- taajuuden säätö
- jännitteen säätö
- ylimääräisten suoja- ja kytkinlaitteiden tarve saarekkeen ja sähköisen tapainon luomisessa
- synkronointilaitteiston tarve kytkettäessä saareke takaisin pääverkkoon

(Kumpulainen ym. 2006, 78-81.)

## **5.5 Hajautetun tuotannon vaikutukset sähköverkkoon**

Sähköverkko ja sen suojaukset ovat perinteisesti suunniteltu siten, että tuotanto tapahtuu suurissa laitoksissa keskitetysti, joista sähköä siirretään kuluttajille siten, että siirron suunta on korkeammalta jänniteportaalta matalammalle. Lisääntyvä hajautettu tuotanto muuttaa verkon toiminnan siten, että sähköön tuotantoa voi olla kaikilla jännitetasoilla, sekä sähkönsiirto voi tapahtua myös matalammalta jännitetasolta korkeammalle.

### 5.5.1 Vaikutukset keskijänniteverkon suojaukseen

Hajautettu tuotanto voi aiheuttaa suojaukselle haasteita, kuten on jo edellä maineen kertaan mainittu. Yksittäinen tuotantoyksikkö on vielä helposti hallittavissa, mutta monet ongelmat ilmenevät vasta sitten, kun hajautettua tuotantoa on kytketty verkkoon merkittävästi. Tuotannon määrä ei voi rajoittaa, koska monet toimet ja hankkeet pyrkivät tuotannon lisäämiseen ja myös sähköntuottajia tulee kohdella tasapuolisesti ketään syrjimättä. Yleisten linjausten mukaisesti verkko-yhtiöiden kannattaa kehittää verkkojaan siihen suuntaan, että hajautettua tuotantoa tulee lisää sekä siihen, että tuotanto olisi siihen helposti integroitavissa.

### 5.5.2 Relesuojaus

Sähköasemaa ja sen syöttämää verkkoa on aina suojattava mahdollisesti ilmenevää vikaa vastaan riittävällä suojalaitteistolla. Keskijänniteverkossa käytetään relesuojausta. Sen määrittelyssä kannattaa huomioida suojattavan kohteen teknillinen ja taloudellinen luonne. Suojarele on tärkeä osa sähkönjakelujärjestelmää ja sen tehtävänä on suojattavasta järjestelmästä saadun mittaustuloksen perusteella suorittaa tietty ohjaus tai indikointi samassa tai toisessa sähkönjakelujärjestelmässä. Relesuojaukselle asetetaan vähintään seuraavat vaatimukset:

- Toiminnan on oltava selektiivistä, jotta vian sattuessa mahdollisimman pieni osa verkosta jää pois käytöstä.
- Toiminnan on tapahduttava riittävän nopeasti ja herkästi niin, että vaarat, vauriot, häiriöt ja haitat jäävät kohtuullisiksi sekä verkon stabiilisuus säilyy kaikissa olosuhteissa.
- Suojuksen tulee kattaa aukottomasti koko suojattava järjestelmä.
- Sen on oltava käyttövarma ja mahdollisimman yksinkertainen.
- Käytettävyyden tulee olla hyvä.
- Suojaus on voitava koestaa käyttöpaikalla.

- Suojauksen on oltava hankintakustannuksiltaan kohtuullinen.

Suojaustavat voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan, jotka ovat vaurioituneen komponentin irti kytkevä suojaus sekä verkon ja sen komponenttien käyttöä valvoa suojaus. Vaurioituneen komponentin irti kytkevään suojauksen kuuluu esimerkiksi oiko- ja maasulkusuojaus sekä valokaariviat ja tavoitteena tällä on vaurioiden minimointi, vian leviämisen estäminen ja vaaran välitön rajoittaminen. Verkkoa ja sen komponenttien käyttöä valvovaan suojaukseen kuuluu esimerkiksi ali- ja ylijännitteiden, ali- ja ylitaajuuksien sekä lähtöjen ja muuntajien ylikuormituksen valvonta ja tarvittaessa eroon kytkentä. Tavoitteena tällä suojuksella on mm. rasituksen keston rajoittaminen turvalliselle tasolle. (Inspecta 2006.)

Perinteinen laajalti Suomessa käytettävä suojausjärjestelmä koostuu seuraavista osista:

- oikosulkusuojana on suuntaamattomat ylivirtareleet
- maasulkusuojana on suunnatut maasulkureleet
- jälleenkytkennät käytössä
- Kiskosuojana sähköasemalla
  - ylivirtasuojaus suuntaamattomalla ylivirtareleellä, joka toimii samalla varasuojana lähtöjen releille
  - maasulkusuojaus nolajännitereleellä ( $U_0$ ), joka toimii samalla kiskomaasulun ja maasulkusuojauksen varasuojana
  - kisko-oikosulunsuojauksessa käytetään lisäksi valokaarirelettä, jossa on virtaehto

(Kumpulainen ym. 2006, 128.)

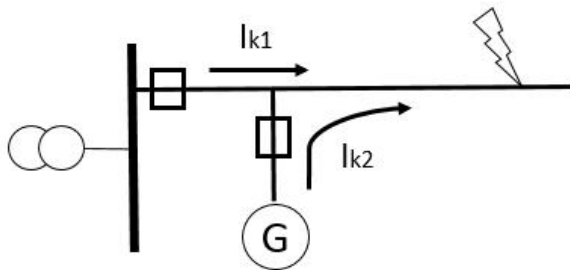
### 5.5.3 Muutos tarpeet relesuojaukseen

Isoimpia haasteita suojuksien toimintaan on eroonkytkentäsuojaus, jota on käsitelty luvussa 5.2. Vastuu eroonkytkentäsuojauksen toteuttamisesta kuuluu tuotantolaitteiston haltijalle, mutta sen toimimattomuuden vaikutukset heijastuvat jakeluverkkoon ja sen suojauksiin. Sen vuoksi kaikkien osapuolten on tehtävä saumatonta yhteistyötä, jotta välttyttäisiin ikäviltä vaaratilanteilta, suojaustoimintojen epäonnistumiselta, tarpeettomilta tuotantolaitteistojen eroon kytkennöiltä sekä vioittumisilta.

Maasulkusuojauksen tarkoitus on estää vaaralliset kosketusjännitteet verkon viikatilanteissa, joissa yleisimmin vaihejohtimen valokaari tai kosketus suojamaadoitettuun osaan voi aiheuttaa sähköturvallisuusriskin. Hajautettu tuotanto saattaa pitkittää maasulkua, mikä tarkoittaa pahimmillaan sitä, että verkon suojalaitteiden oikeellisesta toiminnasta huolimatta maasulkua ei laukaista pois turvallisuusvaatimusten edellyttämässä ajassa. Ongelmia saattaa aiheutua myös siitä, että sähköasemalla keskitetysti kompensoidussa verkosta lähtökatkaisijan toiminnan seurauksena saarekkeeksi kytkeytyneen verkon osan maadoitustapa muuttuu maasta erotetuksi. Tällöin esimerkiksi kompensoidussa verkossa maasulkuvirta saattaa lähdon laukaisun jälkeen jopa kasvaa, koska kompensointi kytkeytyy pois. (Inspecta 2013.)

Iso ongelma seuraa myös siitä, jos tuotanto sijaitsee pj-verkossa ja keskijänniteverkossa tapahtuu maasulku, niin silloin Dyn-kytketyn muuntajan pienjännitepuolella ei havaita maasulkua, koska muuntaja katkaisee nollaverkon. Mikäli pj-verkoon kytketyt tuotantoyksiköt eivät havaitse vikaa, ne jatkavat toimintaansa normaalisti. Pahimmillaan siitä seuraa katkaisijan lauettua ja tehotasapainon toteutuessa pitkäaikainen vikaantunut saareke. Maasulun pitkittyminen lisää aina myös kaksoismaasulun syntymisen riskiä. (Inspecta 2013.) (Kumpulainen ym. 2006, 16-48.)

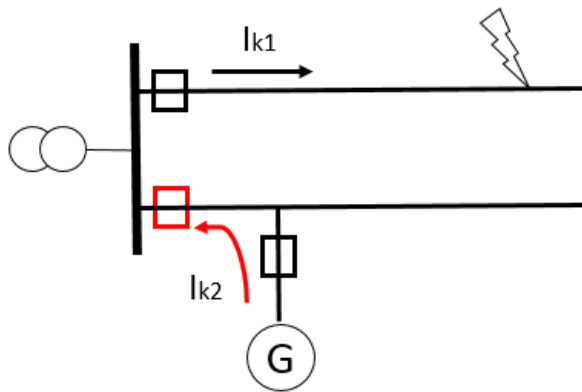
Tuotantoyksikkö voi estää oikosulkusuojauksen toiminnan syöttämällä vikavirtaa vikapaikkaan, tämän seurauksena releen mittaama virta jää alle asetellun arvon ja estää suojauksen asianmukaisen toiminnan. Tämä ongelma voi esiintyä erityisesti tilanteessa, jossa lähdön alkuosalle on kytketty tuotantoa ja vika tapahtuu johdon loppupäässä, tämä on esitetty kuviossa 20. Tämä on mahdollista välttää käyttämällä välirikattaisijaa, muuttamalla suojareleen havahtumisarvoa tai rajoittamalla tuotantoyksikön tuottamaa oikosulkuvirtaa liittämällä se suuntaajan kautta jakeluverkkoon tai lisäämällä generaattorin ja jakeluverkon väliin kuristin. (Inspecta 2013.)



Kuvio 20. Suojauksen toiminnan estyminen verkon oikosulussa.

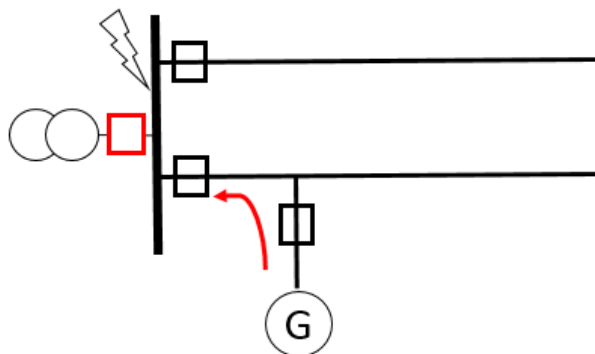
Hajautetun tuotannon lisääntyminen johtolähdölle voi johtaa myös verkon oikosulkuvirran kasvuun, mistä voi aiheutua kytkinlaitteiden ja johtojen mitoituksen sekä suojauksen muutostarpeita. Jos hajautetun tuotannon osuus nousee suureksi, siitä voi seurata pahimmillaan myös oikosulkuvirtatason pieneminen. Tämä johtuu siitä, että perinteistä oikosulkumagnetoinnilla varustettuja tahtigeneraattoreita käyttävää tuotantoa poistetaan tuotannosta. Pienentynyt oikosulkuvirtataso voi vaarantaa ylivirtasuojauksen toiminnan, minkä lisäksi se heikentää sähkön laatua esimerkiksi huonontamalla jännitejäykkyyttä. Jännitejäykkyyden vähentyminen voi näkyä pientuotannon tarpeettomana verkosta irtoamisina johtuen lisääntyneistä jännitekuopista jakeluverkossa. (Kumpulainen ym. 2006, 15.)

Verkkoon kytketty tuotantoyksikkö voi aiheuttaa toisella johtolähdöllä olevan vian johdosta tapahtuva oman johtokatkaisijan tarpeettoman laukeamisen. Tämä voi tapahtua siksi, koska omalle johtolähdölle kytketty tuotanto syöttää oikosulkuvirtaa vikaantuneeseen johtolähtöön (kuvio 21). Tämä voidaan välttää käyttämällä suunnattua ylivirtarelettä joka huomioi ainoastaan lähdölle päin kulkevan virran. Myöskin edellä mainittu oikosulkuvirran rajoittaminen on mahdollinen keino välttää tarpeettomat johtolähdön laukeamiset. (Inspecta. 2013)



Kuvio 21. tarpeeton johtolähdön laukeaminen viereisen johtolähdön viassa.

Kiskoviassa jossa kiskosuoja laukaisee vain syöttökatkaisijan kuten kuviossa 22 on esitetty, voi vian eroonkytkentä vaarantua tuotantoyksikön syöttämän vikavirran takia. Tämä voidaan välttää antamalla valokaari- tai ylivirtareleeltä siirtolaukaisu käsky myös johtolähtöjen katkaisijoille, ainakin sellaisille missä sijaitsee tuotantoyksiköitä. (Inspecta 2013.)



Kuvio 22. Takasyöttö johtolähdöltä kiskoviassa.

Suurin osa jakeluverkoston vioista on nk. ohi meneviä vikoja ja nämä avojohdolla esiintyvät valokaariviat poistuvat, kun vikapaikka käytetään virrattomana. Arviolta 70-90 % vioista selvitetään jälleenkytkennöillä, erityisesti pikajälleenkytkennällä. Verkkoyhtiöillä on pyrkimyksiä vähentää jälleenkytkentöjä ja yksi keino on muuttaa verkon maadoitustapa maasta erotetusta kompensoiduksi eli silloin puhutaan yleisesti sammutetustaverkosta. Keskitetysti kompensoidussa verkossa maasulkuvirta saadaan niin pieneksi, että vian aiheuttama valokaari sammuu itsestään, ilman katkaisijan toimintaa. Hajautettu tuotanto voi ylläpitää jännitettä mikä johtaa todennäköisesti siihen, että sähköaseman katkaisijan jälleenkytkentä epäonnistuu. Jotta jälleenkytkennät onnistuisivat, hajautetun tuotannon nopea poiskytkentä LoM:illa on tärkeää. (Inspecta 2013.)

Vaiheoppositio syntyy, kun katkaisijan kummallakin puolella olevat syöttölähteet joutuvat epätahtiin virheellisen tahdistuksen, ylikuormituksen tai oikosulun takia. Pikajälleenkytkennässä on riski vaiheoppositioon joutumisesta erityisesti silloin, kun johtolähdön tuotanto ja kulutus eivät ole lähellä tasapainoa. Tällöin tuotanto-yksiköissä voivat generaattorit joko kiihtyä tai hidastua ja ajautua kauas pääverkon tahdistasta. Vaiheoppositio tilanne voidaan välttää käyttämällä synchronism check-relettä, joka ennen katkaisijan sulkemista tarkistaa tahdissa olon tai sen,



että johto on jännitteetön. Synchrocheck-toimintoa voidaan käyttää myös varasuojana eroonkytkentäsuojaukselle epätahtisen jälleenkytkennän estämisessä. Toisin tällä siirretään myös ongelma tuotantoyksiköltä verkkoyhtiölle. Edullisin ja helpoin keino hoitaa vaiheoppositio olisi jälleenkytkennän väliajan pidentäminen, joka on yleisesti 0.4 sekuntia ja se on joillakin verkkoyhtiöissä USA:ssa 5 sekuntia. Mutta koska sähkön toimitusvarmuuteen kohdistuu aikaisempaa kriittisempiä odotuksia, niin paras ratkaisu on tehokas eroonkytkentäsuojaus, joka kytkee tuotantoyksiköt nopeasti pois verkosta katkaisijan lauettua tai jopa jo ennen sitä. (Inspecta 2013) (Kumpulainen ym. 2006, 25.)

#### **5.5.4 Vaikutukset verkon jännitteeseen**

Jännitteensäädön tarkoitus jakeluverkossa on pitää kuluttajien jännitetaso sallituissa rajoissa kaikissa kuormitustilanteissa. Kuten edellä on useasti mainittu, niin nykyisessä jakeluverkossa tehoa syötetään pääsääntöisesti yhdestä suunnasta. Jännitteensäätö jakeluverkossa tapahtuu sähköasemalla sijaitsevalla päämuuntajan käämikytkimellä, lisäksi jännitettä voidaan säätää myös sähköaseman kompensointikondensaattorilla sekä jakelumuuntajien väliottokytkimillä.

Hajautetun tuotannon lisääntyminen tulee lisäämään myös jännitteen vaihtelu- aluetta verkossa. Tyypillinen ongelma tulee olemaan jännitteen nousu kyseisellä johtolähdöllä, ongelmat tulevat esiintymään tyypillisesti siellä missä jakeluverkko on sähkötekniisesti heikko. Jos hajautettua tuotantoa tulee huomattava määrä jollekin johtolähdölle, saattaa tuotannon irti kytkeytymisestä aiheutua vakavia ja laajoja jänniteongelmia. Kyseinen tilanne voi syntyä esimerkiksi jälleenkytkennästä, jonka seurauksena tuotantoyksiköt kytkeytyvät irti verkosta. Ongelma korostuu varsinkin silloin, jos katkos tapahtuu huippukuormituksen aikaan. Suunnittelussa onkin huomioitava kaksi käyttötilannetta, ensiksi maksimikuormitustilanne, jossa tuotantoteho on minimissään ja toiseksi minimikuormitustilanne, jossa tuotantoteho on maksimissaan. (Kumpulainen ym. 2006, 15.)

Hajautetusta tuotannosta aiheutuvia jännitetason vaihteluja voidaan ehkäistä useilla eri menetelmillä. Keskijänniteverkon vahvistaminen vaihtamalla johtimet poikkipinnaltaan suuremmiksi on perinteisin ja yksinkertaisin tapa. Reaktoreilla voidaan rajoittaa jännitteenousua ja sen toiminta perustuu reaktorin kuluttaman loisivirran suuntaan joka on päinvastainen kuin johdolla kulkevalla pätöteholla. Sarja- tai rinnakkaiskondensaattoreita kytkemällä verkkoon voidaan pienentää jakeluverkon jännitteen alenemaa. (Surakka 2009, 8-9.)

Sähkönlaadun parantamiseksi on tarjolla myös monia kehittyneitä tehoelektronikan tuotteita, sähkötekniikassa näistä käytetään termiä FACTS (Flexible AC Transmission Systems). FACTS käsitteen sisälle kätkeytyy lukuisia sähkön laadun hallinta laitteita, joilla pyritään parantamaan sähköverkon toimintavarmuutta, kapasiteettia sekä ennen kaikkea joustavuutta, näitä on lueteltu taulukossa 6 ja taulukossa 7 on lueteltu näiden laitteiden toimintoja ja mitä sähköisiä ilmiöitä niillä pystytään korjaamaan. (Kylkisalo ym. 2007, 29.)

Taulukko 6. Sähkön laadun ja luotettavuuden hallintaan soveltuvia tekniikoita. (Alanen ym. 2006, 43.)

Lyhenne	Engl. nimitys	Nimitys	Laitevalmistajia
SA	Surge arrester	Ylijännitesuoja	
BESS	Battery	Akut	Exide, Yuasa, Matsushita, Johnson, JSB, Varta
STATCOM	Static synchronous compensator	Staatinen tahtikompensoattori	ABB, Siemens, S&C Electric Company
DSC	Dynamic Synchronous Condenser	Dynaaminen tahtikompensoattori	American Superconductor
DSC	Distribution Series Capacitor	Sarjakondensaattori	Nokian Capacitors, ABB
DVR	Dynamic voltage restorer	Dynaaminen jännitteen säätäjä	ABB, Siemens, S&C Electric Company, American Superconductor
PFCC	Power factor correction capacitor	Tehokerrointa korjaava kondensaattori	
SMES	Superconducting magnetic energy storage	Suprajohdava magneettinen energia- varasto	American Superconductor
SETC	Static electronic tap changer	Staatinen sähköinen käämikytin	
SSTS	Solid-state transfer switch	Elektroninen vaihtokytkin	Powerware, MGE, Toshiba, Chloride, GE
SSCB	Solid-state circuit-breaker	Elektroninen katkaisija	Siemens, The ABB Group, General Electric, Westinghouse-Cutler-Hammer
SVC	Static var compensator	Staatinen loistehon kompensoattori	ABB, Nokian Capacitors
TSC	Thyristor switched capacitor	Tyristorikytketty kondensaattori	ABB, Nokian Capacitors
UPS	Uninterruptible power supply	Keskeytymättömän sähkön syöttölaite	Powerware, APC, Toshiba, MGE, Chloride, GE
APF(TF)	Active power filter or tuned filter	Aktiivisuodin	Nokian Capacitors, ABB

Taulukko 7. Sähkön laadun ja luotettavuuden hallintaan soveltuvien tekniikoiden toimintoja. (Alanen ym. 2006, 44.)

Laite	SA	BESS	STATCOM	DSC	DVR	PFCC	SMES	SETC	SSTS	SSCB	SVC	TSC	UPS	APF(TF)
Kuopat		x			x		x	x	x		x		x	
Keskeytykset		x					x		x	x			x	
Hetkellinen ylijännite		x			x		x	x			x		x	
Transientit	x	x	x		x		x					x		x
Ylijännite		x	x			x	x	x			x		x	
Alijännite		x	x	x		x	x	x			x	x	x	
Harmoniset yliaallot			x								x			x
Toistuvat häiriötransien-														x
Jännitteen vaihtelu/ välkyntä/flikkeri		x	x	x	x		x				x			

## **6. Tulokset ja johtopäätökset**

Tässä luvussa kokoan teoriaosuuden kirjallisuudesta esille nousseita asioita ja muodostan niistä tutkimuskysymysten pohjalta johtopäätöksiä. Johtopäätöksissä on myös hyödynnetty kirjoittajan aikaisempaa tietämystä ja työkokemusta sähkölaitosalalta.

### **Pienvesituotanto**

Vesivoimaloita voidaan käyttää sekä perusenergian tuottamiseen sekä säätövoimana, koska sillä voidaan nopeasti vastata kysynnän muutoksiin. Vesivoimalla ei ole energian varastointiin liittyvää ongelmaa, sillä vesialtaat voimaloiden vieressä ovat toimivia energiavarastoja. Vesivoiman etuna on muihin sähkön tuotanto muotoihin verrattuna, että sillä pystytään tuottamaan sähkö heti, kun vesi vapautetaan. Vesivoima ei ole myöskään riippuvainen auringon paisteesta, tuulesta tai monimutkaisesta ja pitkästä käynnistysprosessista.

### **Aurinko- ja tuulivoima**

Aurinko- ja tuulivoimalat ovat hyvä lisä hajautetussa sähköntuotannossa, mutta perus- tai säätösähkön tuottamiseen ne eivät sovellu. Pientaloihin asennetut aurinkopaneelit lisääntyvät voimakkaasti. Tulevaisuudessa niiden hyötysuhteet paranevat, energiavarastot kehittyvät ja hinnat halpenevat. Tuulivoiman hyödyntäminen perustuu isoihin tuulipuistoihin, joita rakennetaan tuulioloiltaan otollisiin kohteisiin. Pientuulivoiman rakentamista rajoittaa se, että tiiviisti rakennettuihin ympäristöihin on vaikea saada rakennuslupaa ja lisäksi se tarvitsee tuulelle esteettömän ympäristön.

### **CHP-laitokset**

Yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannossa oleellista on löytää kohde, jossa lämmöntarve on riittävä ja tasainen. Voimalaitoksissa lämmön ja sähkön välistä tuotantosuhdetta ei voida muuttaa tai sen muuttaminen ei ole kannattavaa. Yhteistuotannossa positiivisena vaikutuksena seutukunnalle voidaan nähdä paikallisen polttoaineen käyttäminen ja siitä seuraavat työllistävät sekä muut taloudelliset vaikutukset. CHP-laitoksissa ongelmaksi voi muodostua riittävän laadukkaan ja hinnaltaan kilpailukykyisen polttoaineen saatavuus ja riittävyys, sekä hyvin toimivan polttoainelogistiikan ja – varastoinnin toteuttaminen. Myös CHP-laitoksien rakentamista rajoittaa se, että tiiviisti rakennettuihin ympäristöihin on vaikea saada rakennuslupaa. Uusia alueita kaavoitettaessa olisi niissä jo huomioitava ja varattava alueet mahdollisille tuotantoyksiköille.

### **Hajautettu pienimuotoinen sähköntuotanto**

Sähkön markkinahinta sekä poliittiset päätökset tulevat pitkälti määrittämään milloin, missä ja missä muodossa hajautettua sähköntuotantoa tulee olemaan. Sähköntuotanto omaan käyttöön on kannattavaa, mutta sen myyminen eteenpäin nykyisillä sähköhinnoilla ei sitä ole. Jos Suomen syöttötariffi olisi Saksan mallin mukainen eli jakeluverkonhaltijalla olisi ostovelvollisuus tuotetusta sähköstä, lisäisi tämä kiinnostusta hajautettua sähköntuotantoa kohtaan. Tämän seurauksena sähkön markkinariski siirtyisi pois tuottajalta ja hajautetusta sähköntuotannosta aiheutuvat kustannukset siirtyisivät kuluttajien maksettaviksi. (Salo 2015, 18.)

Mikäli asiaa tarkastellaan sähkönjakeluverkon luotettavuuden lisäämisen kannalta, niin silloin pitäisi lisätä jakeluverkonhaltijan päätäntävaltaa voimalaitoksella tuotettavan sähkön suhteen. Nykyisin sähköntuottaja päättää itse tai sähkön ostavan tahon kanssa yhdessä siitä, milloin ja kuinka paljon voimalaitoksella tuotetaan sähköä. Esimerkiksi nykyisin tilanteessa jossa voimalaitosta pystyttäisiin käyttämään saarekkeessa pääjakeluverkon vikaannuttua, maksetaan sähkön-

tuottajalle samaa korvausta tuotetusta sähköstä kuin normaalitilanteessakin. Nykyisessä tilanteessa, jossa sähkötuottaja itse määrittää tuotantonsa ja mikäli hinta ei ole riittävä korkea, voi tuottaja joko pienentää tehoa tai lopettaa tuotannon kokonaan. Seurauksena olisi, että myös saarekkeessa ollut verkon osa on ilman sähköä tai se menettää tehoasapainon. Siirtymällä järjestelmämalliin, jossa jakeluverkonhaltijalle olisi määritelty ostovelvollisuus tuotetulle sähkölle, voitaisiin sille antaa myös oikeus vaikuttaa tuotantoon. Tällöin jakeluverkonhaltija määrittäisi osaltaan milloin ja kuinka paljon sähköä tuotetaan. Saarekekäyttö on vaikeammin toteutettavissa tilanteessa, jossa jakeluverkonhaltijalla ei ole mahdollisuutta vaikuttaa sähköntuotantoon.

### **Sähkönjakeluverkko**

Hajautettu sähköntuotanto tuo haasteita jakeluverkon kehittämislle. Sähköverkon suojaus ja sähkönlaadun ylläpitäminen muuttuu monimutkaisemmaksi hajautetun tuotannon lisääntyessä. Pahimmillaan tuotantoyksiköt voivat häiritä toistensa toimintaa jakeluverkon välityksellä. Tällainen tilanne mahdollistuu, kun jollekin johtolähdölle tulee paljon tuotantoa ja samalla lähdöllä on vähän kuluusta. Jos sähkönlaatu tai muu häiriö johtuu yhdestä tuotantoyksiköstä, voidaan tuotantolaitoksen omistaja velvoittaa poistamaan häiriön aiheuttaja. Jakeluverkonhaltijan on korjattava ongelma, jos laatu poikkeamat johtuvat monen tuotantoyksikön yhteisvaikutuksesta.

Jakeluverkkoja kehitetään entistä häiriövarmemmiksi, koska vaatimukset sähkön toimitusvarmuutta kohtaan ovat kasvaneet. Jakeluverkkoja kehitetään jo nyt jatkamalla jakeluverkkoa pienempiin suojausvyöhykkeisiin. Tämä mahdollistaa sen, että jakeluverkkoon jäisi toimivia saarekkeita mahdollisissa vikatilanteissa. Jos verkonkehitys laiminlyödään ja siihen liitetään huomattavasti tuotantoa, tulokseksi saadaan vaarallinen, hallitsematon ja epävakaa jakeluverkko, josta kärsivät sekä verkon käyttövarmuus että kuluttajat ja tuottajat.

Uutta jakeluverkkoa suunniteltaessa on huomioitava sen soveltuvuus mahdollisiin tulevaisuudessa tuleviin sähkönjakelu- ja voimalaitostekniikkoihin, koska jakeluverkkojen teknillinen käyttöikä on useita kymmeniä vuosia.

Tulevaisuudessa hajautetun tuotannon lisääntyessä tulee jakeluverkko muuttamaan kantaverkon kaltaiseksi. Tällöin verkon käyttötapa voi muuttua säteittäisesti käytetystä verkosta rengasverkoksi, josta seuraa muutostarvetta suojaus- ja tarkasteluun. Lisäksi jakeluverkkoon tulee älykästä tehoelektroniikka, jonka hallinta ilman toimivia etäyhteyksiä voi osoittautua työlääksi. Tulevaa verkkoa suunniteltaessa olisi hyvä miettiä myös mahdollisesti tarvittavien tietoliikenneyhteyksien tarvetta. Kun äly verkossa lisääntyy, myös sieltä saatavan tiedon hallinnan tarve lisääntyy. Tarvetta tiedolle tulee olemaan, mikäli haluamme toimivat smart grid -järjestelmät.

Lisääntyvä tekniikka, entistä monimutkaisemmat suojausteknologiat ja tarve sähkönjakelun käyttövarmuuden lisäämiseen tarkoittaa sitä, että työntekijöiden on syvennettävää tietämystään ja tämän lisäksi tietojärjestelmien on pystyttävä vastaamaan hajautetun sähköntuotannon lisääntymisen tuomiin haasteisiin. Haasteina on esimerkiksi verkostolaskennan monimutkaistuminen, joka johtuu jakeluverkossa olevan tuotannon, tehoelektroniikan ja muiden komponenttien yhteisvaikutuksesta sähkönjakeluun.

Uusien ja vanhojen teknologioiden yhteensovittamisessa tulee todennäköisesti olemaan ongelmia. Tämä voidaan välttää standardisoimalla teknologiat yhteensopiviksi. Tulevaisuuden älykkään jakeluverkon tavoitteena on, että siihen on helpposti (plug and play) liitettävissä tuotannot, älykkäät komponentit ja mahdollisesti myös kuluttajien älykodit. Tämän saavuttaminen on lähempänä esineiden internetin (IoT, Internet of Things) ja muiden kehittyvien tekniikoiden avulla.

## 7. Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä hajautetun sähköntuotannon hyödyntämisen mahdollisuuksiin sähköjakelun toimitusvarmuuden lisäämisessä. Sähköjakelun toimitusvarmuus sekä hajautettu pienimuotoinen energiantuotanto ovat molemmat ajankohtaisia asioita, ja ne on huomioitu laajalti niin valtakunnallisesti kuin globaalisti. Molemmista aiheista on olemassa paljon tutkimustietoa, mutta opinnäytetyöni näkökulmasta tutkimustietoa on vähän. Aineiston analyysissä käytin aineistolähtöistä sisällönanalyysiä jossa korostuu teoriaohjaavuus.

Tutkimusmateriaalina työssäni käytin alan kirjallisuutta, aiheisiin liittyviä tutkimustuloksia ja olen hyödyntänyt myös sähkölaitosalan osaamistani. Selvitystyön alkuperäisenä tarkoituksena oli tutkia hajautetun sähköntuotannon hyödyntämistä sähköjakelun toimitusvarmuuden parantamiseksi. Aineisto oli luonteeltaan tekstiä joten tutkimusmenetelmäksi valitsin laadullisen tutkimuksen. Tutkimustulosten luotettavuuden ja yleistettävyyden kannalta olisi opinnäytetyö pitänyt rajata käsittelemään saarekekäyttöön liittyviä ongelmia.

Tämän tutkimuksen lopputulosta tarkastellaan pääasiassa jakeluverkon kannalta. Laajempi tarkastelu olisi vaatinut yksityiskohtaisempaa tutkimusta voimalaitostekniikasta.

Jatkossa olisi kiinnostavaa selvittää Saksan mallin mukaisen syöttötariffin vaikutus pientuotannolla tuotetun sähkö hintaan. Lisäksi jatkotutkimuksena voisi selvittää sähkö hinnoittelu saarekekäytössä. Asian tekee tutkimisen arvoiseksi se, että sähköjakeluverkon vian takia asiakkaalle toimittamatta jääneen sähkö hinta on 11 €/kW. Jos voimalaitosta käytetään saarekekäytössä vian aikana, saa sähköntuottaja tuosta summasta alle sadasosan. Lisääntyisikö kiinnostus hajautettua sähköntuotantoa kohtaan, jos olisi olemassa Saksan mallin mukainen syöttötariffi ja mahdollinen saarekekäyttö olisi huomioitu hinnoittelussa.



Opinnäytetyö prosessin aikana olen perehtynyt siihen, kuinka hajautettua energiatuotantoa liitetään osaksi toimivaa sähköjakeluverkkoa. Olen tunnistanut siihen liittyviä ongelmia ja löytänyt sen mukanaan tuomia mahdollisuuksia. Tämä on antanut minulle ammatillisen kompetenssin lisäksi kipinän tutkia aihetta syvällisemmin. Työssäni pystyn hyödyntämään tietopohjaa, jonka hajautetusta sähköntuotannosta olen opiskeluni myötä saanut ja tälle perustalle on hyvä rakentaa ammatillista osaamista.

## 8. Lähteet

Aaltonen J, Ukkonen J. 2008. Pienet alle 4 MW yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto mahdollisuudet. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

ABB Oyj. 2017. Älykäs sähköverkko on energian internet. Kohti uusiutuvaa tuotantoa, luotettavaa jakelua ja energiatehokasta käyttöä. [www.abb.com](http://www.abb.com) 8.5.2017

Alakangas E, Erkkilä A, Flyktman M, Helynen S, Hillebrand K, Kallio M, Lappalainen I, Marjaniemi M, Nysted Å, Oravainen H, Puhakka A, Virkkunen M. 2007. Puupolttoaineiden pienkäyttö. Tekes. Helsinki.

Alanen R, Hätönen H. 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta State of art -selvitys. VTT working papers 52. Espoo.

Eklund E. 2011. Jokamiehen opas pientuulivoiman käyttöön, Tampereella tuuleeprojekti. Sitra ECO<sub>2</sub> Ekotehokas Tampere 2020

Elovaara J, Haarla L. 2011. Sähköverkot 1 järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto. Helsinki

Energiateollisuus. 2017. [www.energia.fi](http://www.energia.fi) 8.5.2017

Energiateollisuus ry. 2009. Verkostosuositus YA9:09. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon.

Energiavirasto. 2017. [www.energiavirasto.fi](http://www.energiavirasto.fi)

Fingrid Oyj. Kantaverkkoyhtiö. [www.fingrid.fi](http://www.fingrid.fi) 8.5.2017

Finlex. 2013. Sähkömarkkinalaki 588/2013

Finsolar. 2017. Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulun ylläpitämä aurinkoenergian tietoportaaali. [www.finsolar.net](http://www.finsolar.net)

Gasek Oy. 2017. [www.gasek.fi](http://www.gasek.fi) 3.5.2017

- Halme M, Hukkinen J, Korppi-Tommola J, Linnanen L, Liski M, Lovio R, Lund P, Luukkanen J, Nokso-Koivisto O, Partanen J, Wilenius M. 2014. Kasvua ja työllisyyttä uudella energiapolitiikalla. Helsinki.
- Halme M, Hukkinen J, Korppi-Tommola J, Linnanen L, Liski M, Lovio R, Lund P, Luukkanen J, Nokso-Koivisto O, Partanen J, Wilenius M. 2015. Maamme energia. Helsinki.
- Helen Sähköverkko Oy. 2009. Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon. Helsinki.
- Hietalahti J. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Amk-Kustannus Oy Tammer-  
tekiikka.
- Hirsijärvi S, Remes P, Sajavaara P. 2000. Tutki ja kirjoita. Tummavuoren kirja-  
paino Oy. Vantaa.
- Huhtinen M, Korhonen R, Pimiä T, Urpalainen S. 2011. Voimalaitostekniikka.  
Opetushallitus. Tampere
- Inspecta Koulutus Oy. 2006. Relesuojaus keskijänniteverkossa -kurssimateriaali.  
Tampere.
- Inspecta Koulutus Oy. 2013. Relesuojaukset sähkölaitoksille -kurssimateriaali.  
Vantaa.
- Kallio M. 2016. Mikroluokan CHP-laitteiston esiselvitys. Opinnäytetyö. Jyväsky-  
län ammattikorkeakoulu.
- Karjalainen T. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilanne-  
katsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Oulun Yliopisto Kajaanin Yli-  
opistokeskus. Motiva
- Karppanen J. 2010. Sähköverkkoyhtiöiden omistajuus ja omistajuusstrategiat  
suomessa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Korpinen L. 2008. Sähkövoimatekniikanopus. Opintomoniste sähköenergiatek-  
niikka. Tampere

- Kumpulainen L, Laaksonen H, Komulainen R, Martikainen A, Lehtonen M, Heine P, Silvast A, Imris P, Partanen J, Lassila J, Kaipia T, Viljainen S, Verho P, Järventausta P, Kivikko K, Kauhaniemi K, Lågland H, Saarisalo H. 2006. Verkkovisio 2030 Jakelu- ja alueverkkojen teknologia-  
visio. VTT tiedotteita 2361. Espoo.
- Kumpulainen L, Ristolainen I. 2006. Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen. VTT. Espoo.
- Kylkissalo T, Alanen R. 2007. Tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikroverkoissa. VTT working papers 78. Espoo.
- Kymäläinen M, Pakarinen O. 2015. Biokaasuteknologia raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Suomen biokaasuyhdistys ry. HAMK julkaisut. Hämeenlinna.
- Käpylehto J. 2011. Luonnonsuojelija 2/2011.
- Lakervi E, Partanen J. 2008, Sähkönjakelutekniikka 609. Otatieto. Helsinki
- Lindfors A. 2017. Energiasääennuste tärkeä sähkömarkkinoiden murroksessa, miten ennustetta voidaan parantaa? [www.tekniikkatalous.fi](http://www.tekniikkatalous.fi)
- Mavi. 2017. Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma 2014-2020. [www.mavi.fi](http://www.mavi.fi) 17.4.2017
- Motiva. 2017. [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi) 17.4.2017
- Motiva. 2012. Opas sähkön pientuottajalle. [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi)
- Motiva. 2010. Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla. Loppuraportti 12/2010
- Narva J. 2015. Mikrovesivoimalaitoksen suunnittelu. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu.
- NeroWatt Oy. 2017. [www.aurinkoenergia.fi](http://www.aurinkoenergia.fi) 18.4.2017

- Ojasalo K, Moilanen T, Ritalahti J. 2009. Kehittämistyön menetelmät, uudenlaista osaamista liiketoimintaan. WSOYpro Oy. Helsinki.
- Ollikka K. 2017. Kohti sähkömarkkinamallia 2.0. keskustelupaperi- ja blogisarja. VATT Smart Energy Transition –hanke. <http://smartenergytransition.fi>
- Pesola A, Vanhanen J, Hagström M, Karttunen V, Larvus L, Hakala L, Vehviläinen I. 2014. Sähkön pientuotannon kilpailukyvyyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi. Loppuraportti. Gaia Consulting Oy
- Pienvesivoimayhdistys ry. 2017. Pienvesivoimalaopas. [www.pienvesivoimayhdistys.com](http://www.pienvesivoimayhdistys.com) 20.4.2017
- Purhonen M. 2010. ORC-prosessin käyttö sähköntuotannossa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan Teknillinen yliopisto.
- Salo M. 2015. Energia käänne Saksan ja Suomen energiapoliittiset valinnat. Hämeen Kirjapaino Oy. Tampere.
- Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2017. [www.tuulivoimayhdistys.fi](http://www.tuulivoimayhdistys.fi)
- Surakka P. 2009. Jännitteensäätö hajautetussa sähköntuotannossa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Tekes. 2017. [www.tekes.fi](http://www.tekes.fi) 17.4.2017
- Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Helsinki.
- Vero. 2017. Kotitalousvähennys. [www.vero.fi](http://www.vero.fi) 15.4.2017
- Vieri V. 2015. Vesivoimalaitoksen generaattoreiden oikosulkulaskenta ja relesuojaus. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu.
- Vihanninjoki J. 2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa. Nykytila ja tulevaisuus sekä vaikutukset ilmanlaatuun. Suomen ympäristökeskus SYKE.
- VTT. 2017. [www.vtt.fi](http://www.vtt.fi) 2.5.2017

Wallin M. 2012. Pienen kokoluokan CHP-tuotannon kannattavuus kunnallisen lämpölaitoksen yhteydessä. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen yliopisto.