

KANDIDAATINTYÖ

24.3.2009

**AKTIIVINEN JÄNNITTEENSÄÄTÖ HAJAUTETUSSA  
SÄHKÖNTUOTANNOSSA**

Pasi Surakka  
Kirstintie 17 A 1  
02760 Espoo  
Puh. +358445701095

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta, Sähkötekniikan osasto

Tekijä: Pasi Surakka

### **Jännitteensäätö hajautetussa sähköntuotannossa**

Kandidaatintyö

2009

35 sivua, 15 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite.

Tarkastaja: Jarmo Partanen

Hakusanat: jännitteensäätö, aktiivinen, paikallinen, koordinoitu, hajautettu tuotanto, sähkönjakelu.

Hajautetun tuotannon määrä kasvaa jakeluverkossa tulevaisuudessa ja siksi jakeluverkon toiminta tulee muuttumaan aktiivisempaan suuntaan. Nykyisin tuotannon aiheuttamaa jännitteennousua rajoitetaan yleensä passiivisilla menetelmillä kuten vahvistamalla verkkoa. Tuotantolaitos ei tällöin osallistu jakeluverkon jännitteensäätöön. Tämä saattaa nostaa kapasiteetiltaan suurehkon tuotannon liittymiskustannukset niin korkeiksi, ettei tuotantolaitosta kannata rakentaa. Aktiivisella jännitteensäädöllä tuotantokapasiteettia voitaisiin merkittävästi kasvattaa nykyisissä jakeluverkoissa. Aktiivinen jännitteensäätö voi perustua joko paikalliseen säätöön, jolloin esim. tuotantolaitosta säädetään paikallisen jännitteen perusteella tai koordinoituun säätöön, jolloin verkon komponentteja säädetään kokonaisuutena.

Työssä tutustutaan hajautettuun tuotantoon ja sen vaikutuksiin jakeluverkon jännitetasoissa sekä jännitteensäädössä. Työssä edetään passiivisesta jännitteensäädöstä aktiiviseen jännitteensäätöön. Aktiivisessa jännitteensäädössä tutustutaan muutamaaan kirjallisuudessa esitettyyn algoritmiin ja käytännön toteutukseen. Työssä keskitytään vain verkon jännitetasoon, eikä muita jännitteen laadun ominaisuuksia oteta huomioon.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology, Department of Electricity Engineering

Author: Pasi Surakka

### **Active voltage control in distributed generation**

Bachelor's thesis

2009

35 pages, 14 figures, 2 tables and 1 appendice.

Supervisor: Jarmo Partanen

Keywords: voltage, control, active, local, coordinated, distributed generation, electricity distribution.

Amount of distributed generation will grow in the future and therefore distribution network must function more as an active network. Today voltage rise is avoided with passive methods like renewing the existing network and DG is not allowed to participate to the voltage control. Passive methods could come quite expensive when connecting large amounts of DG to the network. With active voltage control the capacity of connected generation in existing networks can be increased significantly. Active voltage control can be based only on local measurements when output of the DG unit is controlled based on the local voltage measurements or be coordinated when multiple components are controlled based on the network voltages.

In this bachelor's thesis effects of distributed generation to the distribution network voltages and voltage control are studied. Only voltage levels are studied and other voltage qualities are not taken considered.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>LYHENTEET JA MERKINNÄT .....</b>	<b>1</b>
<b>1. JOHDANTO.....</b>	<b>2</b>
<b>2. HAJAUTETTU SÄHKÖNTUOTANTO .....</b>	<b>2</b>
2.1 HAJAUTETUN SÄHKÖNTUOTANNON VAIKUTUKSET JAKELUVERKKOON .....	3
2.2 HAJAUTETUN SÄHKÖNTUOTANNON VAIKUTUKSET JAKELUVERKON JÄNNITTEESEEN .....	4
2.3 ESIMERKKI JÄNNITTEENNOUSUSTA TUOTANNON LIITYMISPISTEESSÄ .....	6
2.4 RATKAISUJA JÄNNITETASON HALLINTAAN HAJAUTETUSSA SÄHKÖNTUOTANNOSSA.....	8
2.4.1 Keski-jänniteverkon vahvistaminen .....	8
2.4.2 Rinnakkaiset virtapiirit.....	8
2.4.3 Loistehon kompensointi .....	9
2.4.4 Sääto- ja jakelumuuntajat.....	9
2.4.5 Tahtikoneen magnetointi.....	9
2.4.6 Epätahtikoneen loistehon kompensointi .....	9
2.4.7 Suuntaajakäytöt.....	10
2.4.8 Tuotantoyksikön tehon rajoitus.....	10
2.4.9 Keski-jänniteverkon rengaskäyttö .....	10
2.4.10 Energiavarastot .....	11
<b>3. JÄNNITTEENSÄÄTÖ NYKYISIN .....</b>	<b>11</b>
<b>4. AKTIIVINEN JÄNNITTEENSÄÄTÖ.....</b>	<b>13</b>
4.1 PAIKALLISIIN MITTAUKSIIN PERUSTUVA JÄNNITTEENSÄÄTÖ .....	15
4.1.1 Tuotantolaitoksen loistehon säätö .....	16
4.1.2 Tahtikoneen magnetointi.....	17
4.1.3 Epätahtikoneen loistehon kompensointi .....	17
4.1.4 Tehoelektroniikka ja tuotantolaitoksen loistehon säätö .....	18
4.1.5 Tuotantolaitoksen päätötehon säätö .....	18
4.1.6 Kuormien ohjaus .....	18
4.2 KOORDINOIDUT JÄNNITTEENSÄÄTÖMENETELMÄT.....	19
4.2.1 Verkon tilan seuranta ja tilaestimointi .....	19
4.2.2 Sähköaseman jännitteensäätöreleen asetusarvon säätö .....	20
4.2.3 Sähköaseman jännitteensäätöreleen ja voimalaitoksen tehokerroinsäätäjien asetusarvojen säätö .....	26
4.2.4 Optimointialgoritmit .....	30
<b>5. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT .....</b>	<b>30</b>
<b>LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>32</b>

## Liitteet:

**Liite I           Laskut kappaleen 2.4 esimerkkiin.**

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AVC	Jännitteensäätörele
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
DB	Jännitteensäätöreleen sallittu säätöpoikkeama
DG	Distributed Generation, hajautettu tuotanto
KJ	Keskijännite
OLTC	On-load Tap Changer, käämikytin
PJ	Pienjännite
RTU	Remote Terminal Unit
STATCOM	Static Synchronous Compensator, staattinen synkronikompensaattori
SVC	Static Compensator, synkronikompensaattori

### Muuttujat

$E$	Kuormitussuhde
$I$	Virta
$P$	Pätoteho
$Q$	Loisteho
$R$	Resistanssi
$S$	Näennäisteho
$U, V$	Jännite
$\Delta U$	Jännitteen muutos
$X$	Reaktanssi
$Z$	Impedanssi

### Alaindeksit

G	Generaattori
L	Kuormitus
n	Nimellinen
ref	Referenssi, vertailuarvo

## 1. JOHDANTO

Ympäristönäkökohdat ja tehoelektroniikan kehittyminen lisäävät hajautettua sähköntuotantoa jakeluverkossa. Jakeluverkko muuttuu aktiivisempaan suuntaan, kun teho ei enää virtaa vain yhteen suuntaan jakeluverkossa. Jännitteennousu on yksi suurimmista ongelmista merkittävän kapasiteetin omaavan hajautetun tuotannon lisäämisessä jakeluverkkoon. Tähän mennessä jänniteongelmia on ratkaistu pääasiassa passiivisin menetelmin. Tulevaisuuden jakeluverkkoa tullaan säätämään hajautetun tuotannon lisääntyessä yhä enemmän aktiivisesti. Aktiivisessa jakeluverkossa jännitettä, tehon siirtoa ja vikavirtoja hallitaan reaaliaikaisesti paikallisella säädöllä tai koordinoitusti tiedonsiirtoa käyttämällä verkon eri komponenttien kesken.

Työssä tutkitaan hajautetun tuotannon vaikutuksia jakeluverkon jännitteisiin ja jännitteensäätöön. Työssä esitetään myös muutama kirjallisuudessa esitetty aktiivisen jännitteensäädön toimintatapa hajautettua tuotantoa sisältävässä jakeluverkossa. Työssä keskitytään vain verkon jännitetasoon, eikä muita jännitteen laadun ominaisuuksia oteta huomioon.

Aktiiviseen jännitteensäätöön voivat osallistua sähköaseman käämikytkin, hajautetut voimalaitokset, kuormat ja kompensattorit. Usealla komponentilla tehtävä kokonaisvaltainen verkon säätötapa vaatii tiedonsiirtoa komponenttien kesken. Säätolakien ja asetuservojen määrittäminen on tehtävä tapauskohtaisesti.

## 2. HAJAUTETTU SÄHKÖNTUOTANTO

Tehon mukaan rajattaessa voidaan tietyn tehorajan alittava tuotanto määrittää hajautetuksi ja ylittävä keskitetyksi. Yleensä hajautetuksi sähköntuotannoksi sanotaan nimellisteholtaan alle 10 MW:n uusiutuviin energialähteisiin tai pienimuotoiseen yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon perustuvaa energiantuotantoa. Pienen koon lisäksi ominaispiirteitä hajautetulle sähköntuotannolle ovat vakioidut tuotteet, modulaarisuus, isot valmistussarjat, miehittämättömyys sekä kulutuksen ja tuotannon läheisyys. Tyypillisiä tuotteita ovat pienet modulaariset energiantuotantolaitteet, kuten tuulivoimalat, teollisuusturbiinit, mikroturbiinit,

lämpöpumput ja aurinkopaneelit. Taulukkoon 1 on kerätty muutamia hajautettuun tuotantoon käytettäviä ratkaisuja ja niiden ominaisuuksia.

(Vartiainen 2002; Wade 2003)

Taulukko 2.1. Uusiutuvien ja pienimuotoisten CHP-tekniikoiden ominaisuuksia. (GODGUNet 2007)

	Yksikkö- teho (kW)	Sähkö- hyöty- suhde (%)	Lämpö- hyöty- suhde (%)	Käyttö- ikä (a)	Huipun- käyttöaika (h)	Investointi (€/kW)	Tuotanto- kustannus (c/kWh)
Tuulivoima	0,1-5000	40-50	-	20	2500	900-1100	4-5
Aurinkosähkö	0,004- 0,1	4-12	-	25	1000	6500- 10000	45-70
Aurinkolämpö	0,3-0,8	-	30-40	20	1000	800-1600	7-14
Biomassakattilat	10- 10000	-	70-90	20	1000/3500	100-200	1-5
Pienvesivoima	20- 10000	80-85	-	30	4000	800-2000	2,5-4
Lämpöpumput	4-45	-	60-75	20	3000	900-1800	4-8
Polttokennot	0.5-2000	38-55	30-45	15	5000	2800-4400	5-8
Kaasu- ja dieselmoottorit	3-10000	30-45	45-50	15	5000	450-1400	2,5-4
Mikroturbiinit	25-250	15-35	50-60	15	5000	1000-1700	3-4
Stirling-moottorit	0,5-25	15-35	50-60	15	5000	1400-2200	4-5
Höyrykoneet ja - turbiinit	0,5- 10000	15-35	40-70	15	5000	1500-3000	3-4

## 2.1 Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset jakeluverkkoon

Jakeluverkkoon kytkettävällä sähkön tuotannolla on tapauksesta riippuen sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia. Tuotantoyksikön koko, sijainti ja tyyppi määräävät jakeluverkkoon aiheutuvat vaikutukset. Merkittävimpiä hajautetun tuotannon aiheuttamia ongelmia ovat jännitetason nousu, suojausten toiminnan häiriintyminen ja vikavirtojen kasvu niin suuriksi,

että komponenttien oikosulkukestoisuus tai katkaisijoiden katkaisukyky ylittyy. Heikoissa verkoissa hajautetun tuotannon liityntäkapasiteettia rajoittaa yleensä liiallinen jännitteenousu ja vahvoissa verkoissa vikavirtatasojen kasvu. Jotta hajautetun tuotantolaitoksen rakentaminen olisi kannattavaa, täytyy edellä mainitut ongelmat pystyä ratkaisemaan siten, että tuotannon liittymiskustannukset pysyvät sallituissa rajoissa.

(Repo 2005; Kulmala 2007)

## 2.2 Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset jakeluverkon jännitteeseen

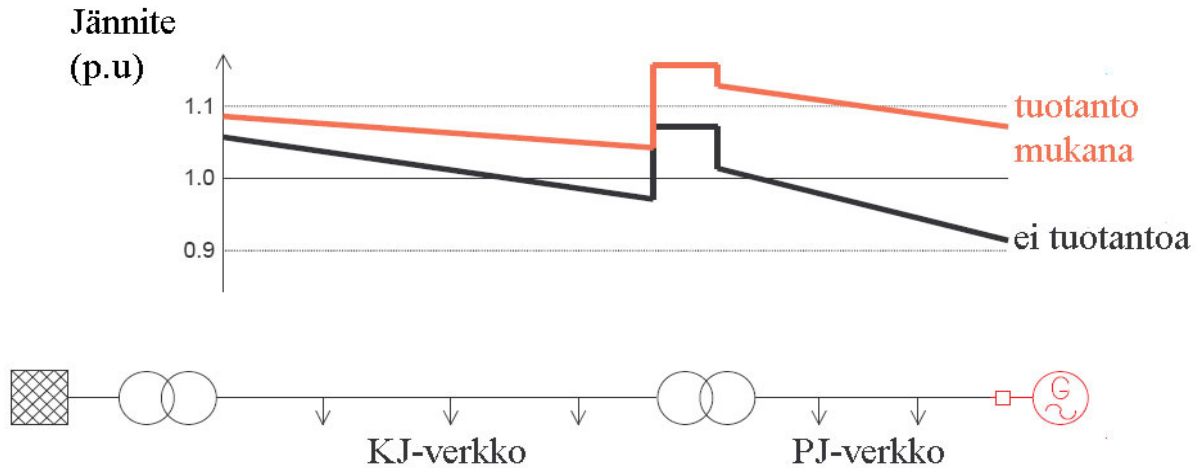
Cenelec (European Committee for Electrotechnical Standardization) ja Sähköenergialiitto ry Sener ovat määrittäneet standardissa SFS-EN 50160 pien- ja keskijänniteverkon jännitteille reunaehdot. Standardin mukaan jokaisen viikon aikana 95 % jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla nimellijännitteestä  $U_n$  välillä  $\pm 10$  %. Lisäksi pienjänniteverkossa kaikkien jännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä  $U_n + 10$  % /  $-15$  %. Usein suunnittelussa sallittu jännitteen vaihtelu pienjänniteasiakkaan liittymispisteessä saa vaihdella välillä  $U_n + 6$  % /  $-10$  % eli pienjänniteasiakkaan jännite tulee olla välillä 207 – 244 V. (SFS 2008; Laaksonen 2004)

Jakeluverkoissa ei perinteisesti ole ollut tuotantoa. Nykyiset jakeluverkot ja niiden jännitteensäätömenetelmät ovat suunniteltu niin, että tehoa syötetään verkkoon vain yhdestä suunnasta. Hajautetun tuotannon vaikutuksesta jakeluverkon jänniteprofiili muuttuu tehonvirtauksen muuttuessa. Jännitteen nousu tuotantoyksikön liittymispisteessä tai sähköaseman läheisyydessä voi rajoittaa jakeluverkon siirtokykyä. Suurimman arvonsa jännitteen nousu saavuttaa, kun tuotantoyksikön teho on maksimissaan ja tarkasteltavan johtolähdön kuormitus on minimissään. Suunnittelussa on tällöin huomioitava vähintään kaksi ääripäätä, joita ovat:

- maksimikuormitustilanne, jossa tuotantoteho on minimissään
- minimikuormitustilanne, jossa tuotantoteho on maksimissaan

Jänniteongelmat esiintyvät tyypillisesti haja-asutusalueilla, missä jakeluverkko on sähköteknisesti heikko. Jännitetason lisäksi tulee ottaa huomioon mm. nopeat jännitemuutokset ja välkyntä. Kaupungeissa jänniteongelmat ovat harvemmin todellinen ongelma. (Repo 2005; Kulmala 2007)

Kuvassa 2.1. on esimerkki hajautetun tuotannon aiheuttamasta jännitteenousuongelmasta. Hajautettu tuotantolaitos aiheuttaa liian korkean jännitteen asiakkaalle perinteisesti suunnitellussa PJ-verkossa lähellä jakelumuuntajaa, mikäli jännitettä ei säädetä esim. tuotantolaitoksen tehoa rajoittamalla.



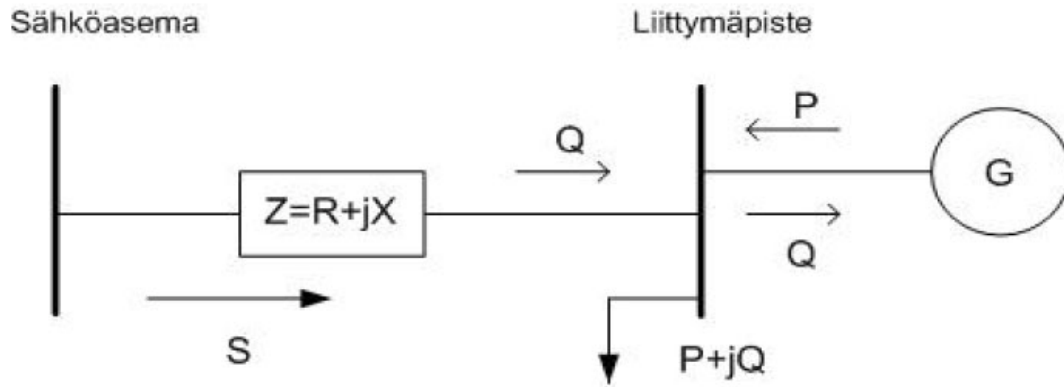
Kuva 2.1. Jännitteenousu jakeluverkossa hajautetun tuotannon kanssa sekä ilman hajautettua tuotantoa. (Nordac 2004)

Tuotantolaitoksen aiheuttama jännitteen suhteellinen muutos liittymispisteessä voidaan likimääräisesti laskea verkon impedanssin ja tehon itseisarvosta yhtälöllä 2.1

$$\Delta U \approx \frac{R \cdot P_{Ng} + X \cdot Q_{Ng}}{U}, \quad (2.1)$$

missä  $\Delta U$  jännitteen muutos,  $U$  on verkon pääjännite liittymispisteessä,  $R$  on verkon resistanssi,  $X$  on verkon reaktanssi,  $P_{Ng}$  on voimalan tuottama pätöteho ja  $Q_{Ng}$  on loisteho. Yhtälöstä havaitaan jännitteen muutokseen vaikuttavat tekijät. Jännite on siis riippuvainen johdon impedanssista, voimalan etäisyydestä sähköasemalta, tuotettavasta sähkötehosta ja johtolähdön kuormituksesta. (Janatuinen 2007)

Mikäli liittymispisteessä on sekä tuotantoa että kuormitusta, joudutaan loistehoa siirtämään kuvan 2.2. mukaisesti generaattorille ja kuormitukselle.



Kuva 2.2. Jännitteen nousu pienvoimalaitoksen liittymispisteessä. (Janatuinen 2007)

Johtimella siirrettävälle näennäisteholle pätee kuvan 2.2. tapauksessa yhtälö 2.2

$$S = P_G - jQ_G - P_L - jQ_L = U_1 \cdot I \quad , \quad (2.2)$$

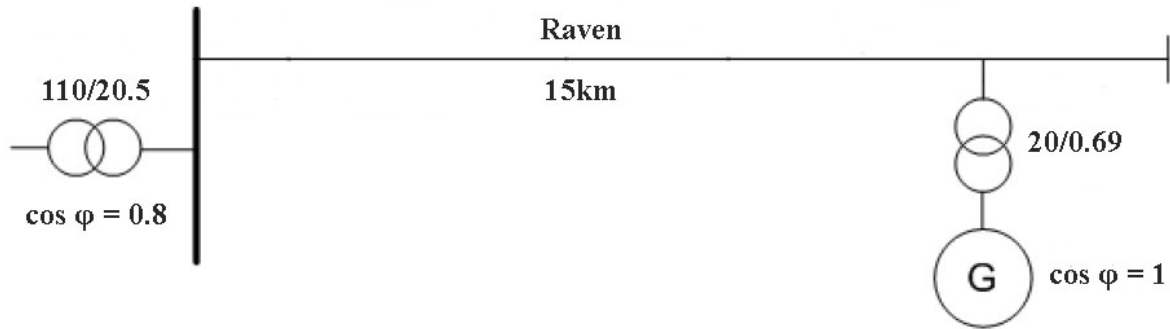
jossa  $S$  on siirrettävä näennäisteho,  $P_G$  on generaattorin pätöteho,  $Q_G$  on generaattorin ottama loisteho,  $P_L$  on kuormituksen ottama pätöteho,  $Q_L$  on kuormituksen tarvitsema loisteho,  $U_1$  on liittymispisteen jännite ja  $I$  on johdolla kulkeva virta. (Janatuinen 2007)

Yhtälöstä 2.2 saadaan jännitteenmuutos tuotantoa ja kuormitusta sisältävälle liittymispisteelle

$$\Delta U = \frac{(P_G - P_L)R - X(Q_L + Q_G)}{U_1} \quad . \quad (2.3)$$

### 2.3 Esimerkki jännitteenoususta tuotannon liittymispisteessä

Tutkitaan kuvan 2.3 pelkistetyn esimerkin avulla hajautetun tuotannon liittymispisteen jännitettä, kun keskijänniteverkon kuormitus on minimissään. Tuotantovoimala sijaitsee 15 km päässä sähköasemalta ja verkon kuormitus vaihtelee välillä 0.5 – 2 MW.



Kuva 2.3. Yksinkertaistettu tapaus hajautettua tuotantoa sisältävästä johtolähdöstä.

Verkon kuormitus on siis minimitalanteessa 0.5 MW ja tuotantovoimala tuottaa parhaimmillaan 6 MW tehokertoimella yksi. Jännite on sähköasemalla vakio 20,5 kV. Johdintyyppinä on Raven, jonka resistanssi on 0,535  $\Omega$ /km ja reaktanssi 0,368  $\Omega$ /km.

Lasketaan ensin jännitteen alenema liittymispisteessä ilman tuotantoa. Seuraavaksi määritetään yhtälöllä 2.1 liittymispisteen jännitteet eri tuotannon arvoilla. Laskutoimitukset ovat liitteessä I. Tulokset ovat kerätty alla olevaan taulukkoon 2.2.

Taulukko 2.2. Jännite generaattorin liittymispisteessä, kun kuormitus johdolla on 0,5 MW.

Tuotanto [MW]	Jännite voimalan liittymispisteessä [kV]
0	20,2
1	20,6
2	21,1
3	21,5
4	21,9
5	22,4
6	22,8

Alle kahden megawatin tuotannolla voimalalla on verkon jännitetasoon pelkästään positiivinen vaikutus eli se kompensoi verkossa tapahtuvaa jännitteen alenemaa. Jännitteenousu liittymispisteessä ja sen läheisyydessä muodostuu ongelmaksi vasta yli kolmen megawatin tuotannolla.

## 2.4 Ratkaisuja jännitetason hallintaan hajautetussa sähköntuotannossa

Jännitteensäätö pyrkii pitämään jännitetason mahdollisimman hyvin sallituissa rajoissa jakeluverkossa kaikissa kuormitustilanteissa. Jakeluverkon asiakkaan jännite pyritään pitämään vakiona, jotta esim. kulutuskojeet toimivat halutulla tavalla. Jännitteensäädöllä pyritään myös pienentämään häviöitä jakeluverkossa ja näin parantamaan verkon siirtokykyä. Siirtokyvyn optimoinnilla voidaan mahdollistaa tuotannon täyden kapasiteetin käyttöön otto. Hajautetun tuotannon aiheuttamaa jännitetason vaihtelua voidaan parantaa useilla eri menetelmillä. Menetelmät liittyvät siihen kuinka tuotantoyksiköitä halutaan ja voidaan hyödyntää jakeluverkon käyttötilanteissa. Kuhunkin tapaukseen paras menetelmä tulee valita niin, etteivät kustannukset nouse liian korkeiksi saatavaan hyötyyn nähden.

### 2.4.1 Keski-jänniteverkon vahvistaminen

Keski-jänniteverkon vahvistaminen vaihtamalla johtolähdön johtimet poikkipinnaltaan paksummiksi on perinteisin tapa parantaa jakeluverkon siirtokykyä. Tuotantopisteen ja sähköaseman välisen impedanssin  $Z$  pienentyessä, pienenee myös tietyn suuruisella virralla  $I$  syntyvä jännitteenousu  $U_2-U_1$  tai jännitteenalenema  $U_1-U_2$  riippuen virran suunnasta. KJ-verkossa impedanssin  $Z$  suuruuteen vaikuttaa merkittävästi johtolähdön resistanssi  $R$ . Johdolla siirrettävä teho on pääasiassa pätötehoa, joten resistanssi vaikuttaa jännitteenousuun merkittävästi. KJ-verkko on yleensä haja-asutusalueilla rakennettu niin, että johtolähdön poikkipinta kapenee lähdön latvaa kohden. Tuotantoyksikön sijoituksella on tällöin suuri vaikutus jännitteenousuongelmaan ja jakeluverkon siirtokyvyn. (Repo 2005)

### 2.4.2 Rinnakkaiset virtapiirit

Johtimien vaihdon lisäksi olemassa olevalle johtoreitille voidaan rakentaa rinnakkainen virtapiiri. Tarkoitus olisi tuoda tuotantoyksikön tuottama teho omaa virtapiiriään pitkin tarpeeksi jäykkään pisteeseen KJ-verkossa. Rinnakkaisen virtapiirin rakentamista tulee harkita, mikäli luotettavuuskriteerit eivät täyty joko taloudelliselta tai tekniseltä kannalta. Rinnakkainen virtapiiri voidaan rakentaa jo olemassa oleville pylväille, erillisille pylväille tai kokonaan eri johtoreittiä käyttäen. Rinnakkaisia virtapiirejä voitaisiin käyttää myös renkaana, jolloin vahvistustarve pienenee. (Repo 2005)

### **2.4.3 Loistehon kompensointi**

Jännitteenousuongelmia voidaan pienentää loistehon kompensointilaitteiden avulla. Reaktorin avulla saadaan jännitteenousua rajoitettua, kun reaktorin kuluttaman loisivirran suunta on päinvastainen johdolla virtaavalle pätöteholle. Jännitteen alenemaa voidaan taas pienentää rinnakkais- tai sarjakondensaattorin avulla. (Repo 2005)

### **2.4.4 Sääto- ja jakelumuuntajat**

Jännitteen sääto lähempänä kuormituspisteitä voidaan toteuttaa sääto muuntajan avulla, esim. 20/20 kV muuntajalla jännitteenoususta kärsivällä johtohaaralla. Sääto muuntajan käämikytkimellä säädetään toisiopuolen jännitettä ja jännitteenousun poistamiseksi riittää, kun käämikytkin toimii vain silloin kun jännitettä halutaan pienentää. Sääto muuntaja on erittäin hyvä vaihtoehto johdin vahvistukselle silloin, kun vahvistettava johdinosuuden pituus on merkittävä ja jännitteenoususta aiheutuu haittaa vain hyvin pienelle osalle jakeluverkosta. (Repo 2005)

### **2.4.5 Tahtikoneen magnetointi**

Tahtikoneen magnetoinnilla vaikutetaan itse tuotantoyksikön loistehoon ja liittymispisteen jännitteeseen. Tämä eroaa edellä mainituista ratkaisumenetelmistä, joissa itse tuotantoyksikkö ei osallistunut jakeluverkon jännitetason hallintaan. Tahtikoneen magnetoinnin sääto olisi joustava ja edullinen tapa keskijänniteverkon jännitetason hallintaan.

(Repo 2005)

### **2.4.6 Epätahtikoneen loistehon kompensointi**

Epätahtikoneen magnetointiin ei voida suoraan vaikuttaa, vaan kone ottaa aina magnetointivirtansa sähköverkosta. Epätahtikoneiden yhteydessä käytetäänkin yleensä loistehon kompensointikondensaattoreita, jolloin tuotantoyksikön tehokerroin säilyy kohtuullisessa arvossa. (Repo 2005)

### **2.4.7 Suuntaajakäytöt**

Tuotantoyksikkö täysin ohjattavalla tehoelektronisella liityntälaitteella voi osallistua loistehon suoraan ohjaukseen. Liityntälaitteita on hyvin monenlaisia. (Repo 2005)

### **2.4.8 Tuotantoyksikön tehon rajoitus**

Tuotantotehnon rajoitus ei voi olla pysyvä ratkaisu liittymispisteen jännitteenousuongelmaan, vaan ratkaisua tulisi etsiä verkon vahvistustoimenpiteistä. Tehon rajoittaminen voi kuitenkin tulla kysymykseen ajoittaisissa jännitteenousuongelmissa, jos verkon vahvistustoimenpiteet voidaan näin välttää ja alentaa tuotantoyksikön liittymiskustannuksia. Vaikka tuotantoyksikön tehoa jouduttaisiin rajoittamaan muutaman tunnin verran vuodessa, ei se vaaranna tuotantoyksikön kannattavuutta. Varsinkin tuulivoimaloiden yhteydessä tuotantotehnon rajoittaminen voi olla kannattava vaihtoehto. (Repo 2005)

### **2.4.9 Keski-jänniteverkon rengaskäyttö**

Perinteisesti keski- ja pienjänniteverkko on käyttötavaltaan säteittäinen eli sähköä syötetään kuhunkin solmuun vain yhdestä suunnasta. Säteittäistä käyttötapaa puoltavat helpompi verkon laskenta, suunnittelu ja suojaus verrattuna rengaskäyttöön. (Repo 2005)

Hajautettu sähköntuotanto tekee jakeluverkoista silmukoidun, jolloin verkko koostuu useista renkaista tai sähkölähteistä. Siirtoverkossa rengaskäyttö on jo häviöiden edullisuuden ja luotettavuuden kannalta tyypillistä. (Repo 2005)

Yksinkertaistetun rengaskäytön avulla voidaan verkon siirtokykyä kasvattaa merkittävästi suhteellisen edullisesti. Rengaskäyttöä voidaan myös käyttää vain tarpeen vaatiessa esim. minimikuormitus ja maksimituotantotilanteissa. Teoriassa tehonsiirtokyky voidaan kaksinkertaistaa yhdistämällä kaksi samanlaista johtolähtöä toisiinsa. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole, koska johtolähtöjen impedanssit sekä kuormitukset ovat erisuuruisia eikä optimaalista paikkaa renkaan muodostamiseksi voida yleensä muodostaa. (Repo 2005)

Rengaskäytöllä voidaan myös vähentää keski-jänniteverkon häviöitä, koska verkon virrat jakautuvat tasaisemmin. Rengaskäytön vaikutus häviöihin on suuri varsinkin suuren

tuotantoyksikön tapauksessa. Keskijänniteverkon rengaskäytössä myös jännite jakautuu tasaisemmin säteittäiseen käyttötapaan verrattuna. Jännitetason vaihtelut ovat nekin vähäisempiä tuotannon ja kuormituksen vaihteluista huolimatta, kuin säteittäisessä käyttötavassa. (Repo 2005)

Rengaskäytössä vikojen aiheuttamat jännitekuopat leviävät laajemmalle alueelle ja ovat aikaisempaa syvempiä. Rengaskäytöstä johtuen renkaan muodostavilla johtolähdöillä asiakkaiden kokemien jännitekuoppien lukumäärä ja syvyys kasvavat. Kaikilla verkon impedanssia pienentävillä eli verkkoa vahvistavilla toimenpiteillä on kuitenkin vastaavanlainen vaikutus. (Repo 2005)

#### **2.4.10 Energiavarastot**

Energian varastointi on yksi tapa kiertää investoinnit verkon vahvistukselle, mikäli verkon siirtokyky estää tuotantolaitoksen verkkoon syötettävän maksimitehon määrää vain ajoittain. Energiavarastojen avulla voidaan säädellä pätötehoa ja tehovaihteluita ja näin rajoittaa tuotannon aiheuttamaa jännitteen nousua verkossa. Energia varastoidaan ylijännitetapauksissa ja syötetään verkkoon myöhemmin jänniterajojen salliessa. Energian varastointiin voidaan käyttää mm. pumppuvoimaloita, erilaisia akustoja, polttokennoja, vauhtipyöriä, suprajohtavia sähkömagneettisia varastoja ja paineistettua ilmaa. (Laaksonen 2004)

### **3. JÄNNITTEENSÄÄTÖ NYKYISIN**

Jännitteensäätö jakeluverkossa pyrkii pitämään kuluttajien jännitetason sallituissa rajoissa kaikissa kuormitustilanteissa. Tähän asti on voitu olettaa, että tehoa syötetään jakeluverkkoon aina yhdestä suunnasta eli suurista keskitetyistä tuotantolaitoksista kuluttajille. Aktiivisesti jännitettä hallitaan jakeluverkossa vain keskijänniteverkon alkupäässä sähköasemalla, jonka jälkeen järjestelmä on passiivinen. Tällaisen säteittäisen jakeluverkon suunnittelu on varsin yksinkertaista, koska voidaan olettaa, että avojohtoverkossa jännite on sähköasemalla suurin ja pienenee mentäessä kauemmaksi sähköasemasta. Jännitteensäätö pyritään toteuttamaan avojohtoverkossa niin, että lähinnä sähköasemaa olevan kuluttajan jännite ei ylitä

maksimijännitearvoa minimikuormitustilanteessa. Vastaavasti kauimpana sähköasemasta olevan asiakkaan jännite ei alita minimijännitearvoa maksimikuormitustilanteessa. Pienen kuormituksen omaavassa maakaapeliverkossa tulee jännitteen nousu maakapasitanssien vaikutuksesta ottaa huomioon. (Lakervi 1995)

Jännitteensäätö jakeluverkossa perustuu pääasiassa päämuuntajan käämikytkimen, sähköaseman kompensointikondensaattorin sekä jakelumuuntajien väliottokytkimien säätöön ja ohjaukseen. Käämikytkimellä voidaan muuntosuhdetta muuttaa  $n. \pm 15\%$ . PJ-verkossa jännitettä säädetään väliottokytkimillä, joilla jännitettä voidaan muuttaa  $\pm 5\%$ . KJ-verkossa olevaa päämuuntajan käämikytkintä säädetään jännitteensäätöreleen avulla. Käämikytkintä voidaan säätää käytön aikana mittausten perusteella automaattisesti, kun taas väliottokytkintä voidaan asettaa vain muuntajan ollessa kuormittamattomana. Väliottokytkimen asento pyritäänkin pitämään vakiona.

(Lakervi 1995; Elovaara 1988)

Jännitteensäätörelellä tarkkaillaan muuntajan toisiojännitettä ja annetaan käämikytkimelle käsky toimia, mikäli jännite ei ole asetetuissa rajoissa. Ohjausta on viivästettävä tarvittava määrä, etteivät tilapäiset jännitevaihtelut aiheuta turhaa edestakaista säätöä.

(Lakervi 1995)

Jännitteensäätörele toimii vakiojännite- tai kompondisäädöllä. Vakiojännitesäädöllä jännite sähköaseman alajännitekiskolla pidetään vakiona. Jakeluverkon kuormituksen kasvaessa sähköaseman jännite alenee, jolloin jännitteensäätörele antaa käskyn käämikytkimelle askeltaa alaspäin. Käämikytkimen muutoksesta loistehon virtaus yläjännitepuolelta alajännitepuolelle kasvaa. Käämikytkimen askeltaminen alaspäin voi näkyä myös yläjännitepuolen jännitteen laskuna, mikäli yläjännitepuolen verkko on heikko tai siirrettävä teho on suuri. (Repo 2003)

Kompondisäädöllä jännitettä muutetaan muuntajan läpi kulkevan kuormitusvirran mukaan. Kompondisäädöllä päämuuntajan alajännitepuolen jännitettä kasvatetaan suuren kuormituksen aikaan ja pienennetään pienen kuormituksen aikaan ja näin kuluttajien kokema jännitetaso pysyy asetetuissa rajoissa paremmin kuin vakiojännitesäädöllä. Hajautettu tuotanto voi sekoittaa kompondisäätäjän toimintaa, mikäli tuotanto pienentää säätäjän havaitsemaa kuormitusvirtaa merkittävästi. Säätäjä vähentää alajännitepuolen jännitettä

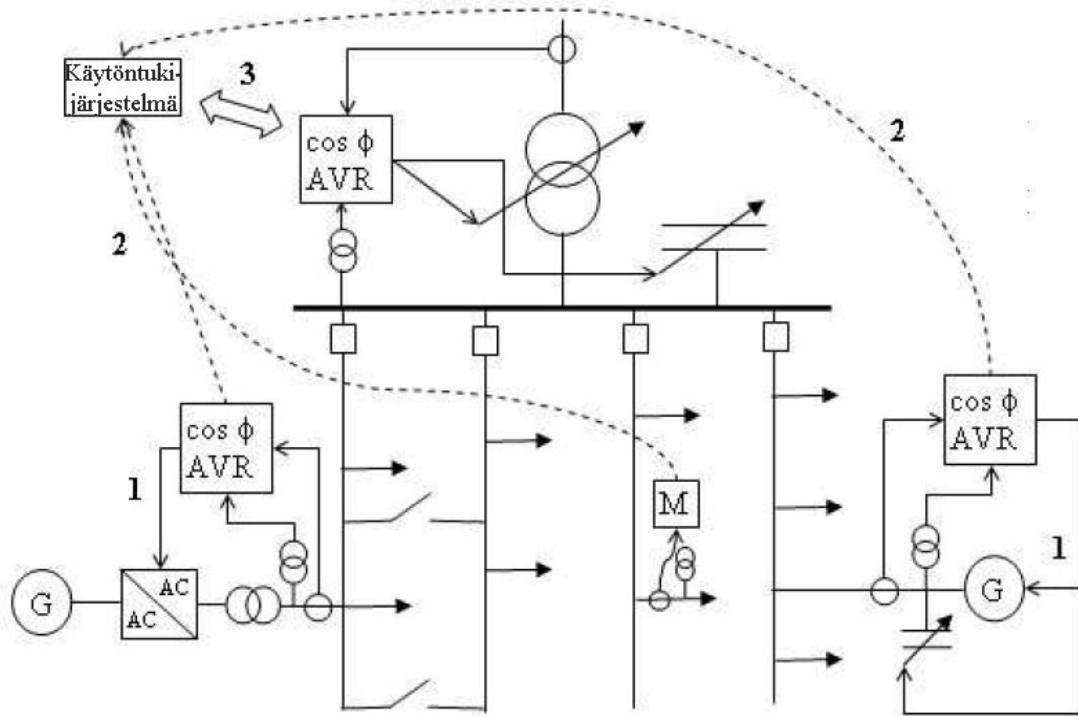
kuormitusvirran pienentyessä ja tästä voi olla haittaa niille johtolähdöille, jotka eivät sisällä tuotantoa. (Lakervi 1995; Elovaara 1988; Repo 2003)

#### **4. AKTIIVINEN JÄNNITTEENSÄÄTÖ**

Hajautetun tuotannon suurinta liittymiskapasiteettia rajoittaa heikoissa verkoissa yleensä tuotannon aiheuttama jännitteennousu. Nykyisin jännitteennousua rajoitetaan yleensä passiivisilla menetelmillä kuten vahvistamalla verkkoa. Tuotantolaitos ei tällöin osallistu jakeluverkon jännitteensäätöön. Tämä saattaa nostaa tuotannon liittymiskustannukset niin korkeiksi, ettei tuotantolaitosta kannata rakentaa. Aktiivisilla menetelmillä, kuten käyttämällä joustavaa liityntätehoa eli säätämällä voimalaitoksen pätö- tai loistehoa tai alentamalla sähköaseman kiskojännitettä, jännitteennousua voitaisiin rajoittaa. Jakeluverkon jännitteensäätöön voisivat osallistua tuotantolaitokset, passiiviset ja aktiiviset kompensattorit, kuormat, energiavarastot, jännitteensäätömuuntajat sekä päämuuntajan käämikytkin. (Kulmala 2007)

Yksinkertaisimmat aktiivisen jännitteensäädön menetelmät voidaan toteuttaa paikallisiin mittauksiin perustuen ilman tiedonsiirtoa verkon eri osien välillä. Hajautetun tuotantolaitoksen pätö- ja loistehoa, sekä kuormia ja kompensattoreita voidaan ohjata paikallisten mittausten avulla. Paikallisiin mittauksiin perustuvia säätötapoja ovat mm. voimalaitoksen loistehon säätö, voimalaitoksen pätötehon leikkaus ja kuormien ohjaus. (Kulmala 2007)

Toisessa ääripäässä ovat paljon mittauksia ja kommunikointia tarvitsevat monimutkaiset jakeluverkon hallintajärjestelmät. Koordinoidut jännitteensäätömenetelmät vaativat toimiakseen tietoa jakeluverkon tilasta ja erityisesti jännitetasosta. Kuvassa 4.1 on periaate aktiivista jännitteenhallintaa omaavasta jakelujärjestelmästä. (Kulmala 2007; Repo 2005)



Kuva 4.1. Jakeluverkon jännitetason hallinta. Paikallista nopeaa jännitteensäätöä merkataan 1:llä, mittauksia 2:lla ja koordinoitua 3:lla. (Repo 2005)

Paikallinen jännitteensäätö tapahtuu ennen käämikytkimellä tapahtuvaa säätöä. Verkosta kerätään mittauksia käytöntukijärjestelmälle koordinoitua tarkentamiseksi. Sähköaseman kiskojännitettä säädetään vain, mikäli paikallisella tuotantoyksikön jännitteensäädöllä ei päästä jännitteenoususta eroon. Kiskojännitettä säädetään tietyissä rajoissa jännitteensäätöreleen avulla, joka säätää sähköaseman päämuuntajan käämikytintä. Kiskojännitteen alentamisen yhteydessä täytyy käytöntukijärjestelmän keskijänniteverkon tilaestimoinnin avulla tarkistaa, ettei jännite muilla lähdöillä laske sallitun minimirajan alle. (Laaksonen 2004)

Aktiivisen jännitteensäädön avulla voitaisiin useissa tapauksissa kasvattaa jakeluverkkoon liitettävän hajautetun tuotannon suurinta liittymiskapasiteettia merkittävästikin, jolloin myös tuotannon liittymiskustannukset vähentyisivät. Esimerkkinä voidaan käyttää Fortum Sähkösiirto Oy:n jakeluverkkoon liitettävän Högsåran tuulipuiston suunnitelmia, joissa ajoittainen jännitteenousu rajoittaa tuotantoyksikön kokoa. Laskelmissa on tarkasteltu kolmea jännitteensäätömenetelmää tuotantoyksikön kiinteän sekä joustavan liityntätehon tapauksissa. Taulukossa 4.1 on esitetty tuotantoyksikön suurimmat sallitut tuotantotehot verkon jännitteiden pysyessä sallituissa rajoissa. (Repo 2005)

Taulukko 4.1. Tuotantoyksikön suurimmat sallitut tuotantotehot johtolähdön kuormituksen funktiona eri jännitteensäätömenetelmillä Högsåran tuulipuiston tapauksessa. (Repo 2005)

Kuormitus (kW)	Tehokerroin yksi		Paikallinen säätö		Koordinoitu säätö	
	Kiinteä	Joustava	Kiinteä	Joustava	Kiinteä	Joustava
364	850	850	1120	1120	2000	2000
473	850	900	1120	1250	2000	2080
572	850	950	1120	1300	2000	2160
690	850	1050	1120	1350	2000	2240
825	850	1150	1120	1550	2000	2320
992	850	1300	1120	1750	2000	2400
1174	850	1500	1120	2000	2000	2500

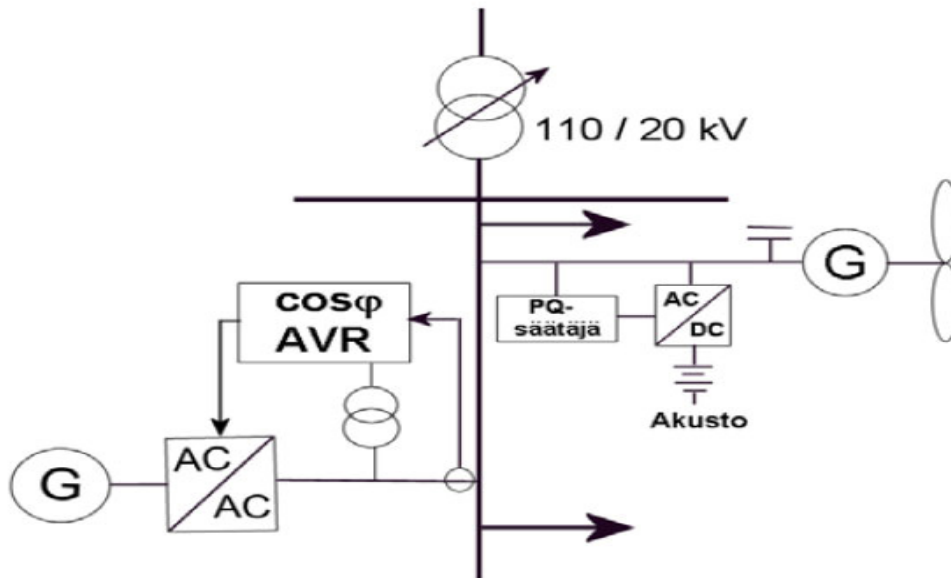
Kuormituksen pienin arvo on 364 kW:a, joka on johtolähdön minimikuormitustilanne ja suurin arvo on 1174 kW, joka on maksimikuormitustilanne. Tuotantoyksikön tehoa säädettäessä niin, että tehokerroin pidetään arvossa yksi, on minimikuormitustilanteessa tuotantoyksikön suurin sallittu teho 850 kW:a. Kiinteällä liityntäteholla johtolähdön kuormitus ei vaikuta tuotantotehon sallittuun arvoon. Joustavan liityntätehon tapauksessa kasvaa tuotantoyksikön suurin sallittu teho johtolähdön kuormituksen mukaan. Paikallisessa säädössä sallitaan tuotantoyksikön säätää loistehoaan jännitteen paikallisiin mittauksiin perustuen. Koordinoitussa säädössä säädetään sekä tuotantoyksikön loistehoa, että käännytyksiin sähköasemalla keskitetyn säätäjän avulla. Paikallisen säädön tai koordinoitun säädön avulla voidaan minimikuormitustilanteessa kasvattaa tuotantoyksikön suurinta sallittua tehoa. Maksimikuormitustilanteessa koordinoitulla säätäjällä voidaan lähes koko tuotantokapasiteetti ottaa käyttöön jännitteiden pysyessä sallituissa rajoissa niin sähköasemalla, kuin tuotantoyksikön liittymispisteessä. Mikäli tuotantoyksikön koko kapasiteetti, 3 MW, haluttaisiin saada käyttöön, tulisi koordinoitun säädön käytön lisäksi verkko muuttaa rengaskäyttöiseksi. (Repo 2003; Repo 2005)

#### 4.1 Paikallisiin mittauksiin perustuva jännitteensäätö

Paikallisiin mittauksiin perustuvassa koordinoimattomassa aktiivisessa jännitteensäädössä ei tarvita tiedonsiirtoa eri verkon osien kesken. Tuotantolaitoksen päto- ja loistehoa voidaan

säätää paikallisen jännitemittauksen avulla. Yleensä tehokkaimmin jännitteeseen voidaan vaikuttaa loisteholla, mutta myös pätöteholla on merkitystä, varsinkin heikoissa verkoissa. Jännitteensäätöön voidaan käyttää myös energian varastointia, tai säädettäviä kuormia ja kompensattoreita. Kuvassa 4.2 on esimerkki paikallisista jännitteensäädöistä tuotantolaitoksen pätö- ja loistehoa säätämällä sekä energian varastointia käyttäen.

(Kulmala 2007)



Kuva 4.2. Paikallista jännitteensäätöä tuotantoyksikön pätö- ja/tai loistehoa säätämällä tai energiaa varastoimalla. (Laaksonen 2004)

#### 4.1.1 Tuotantolaitoksen loistehon säätö

Hajautetun tuotannon aiheuttamaa jännitteennousua voidaan pienentää suurentamalla tuotantolaitoksen loistehon kulutusta. Tuotantolaitoksen kyky säätää loistehoaan riippuu laitoksen verkkoonliityntälaitteistosta. Pysyttäessä toimintarajojen sisäpuolella voidaan tahtigeneraattorin tai taajuudenmuuttajan kautta verkkoon liitettyjen laitosten loistehoa säätää pätötehosta riippumatta. Epätahtigeneraattorin välityksellä verkkoon liittyvän laitoksen pätö- ja loistehoa ei voida säätää toisistaan riippumatta, koska epätahtikone ottaa magnetointivirtansa verkosta.

#### **4.1.2 Tahtikoneen magnetointi**

Tahtikoneen magnetoinnilla vaikutetaan itse tuotantoyksikön loistehoon ja liittymispisteen jännitteeseen. Tahtikoneen magnetoinnin säätö on joustava ja edullinen tapa keskijänniteverkon jännitetason hallintaan. (Repo 2005)

Magnetointia säädetään niin, että tuotantoyksikön liittymispisteen tehokerroin on yksi, jolloin tuotantoyksikkö ei kuluta eikä tuota loistehoa. Magnetointipiiriin liitettävänä säätäjänä toimii joko jännitesäätäjä tai tehokerroinsäätäjä. Jännitesäätäjä pyrkii pitämään tahtikoneen napajännitteen vakiona magnetointivirran säätömahdollisuuksien rajoissa. Tehokerroinsäätäjä pitää huolen siitä, ettei koneen verkosta ottama tai verkkoon syöttämä loisteho ylitä valittuja tehokertoimen arvoja. Yleensä raja määräytyy loistehon ilmaisosuuden perusteella, jos sitä ei ole, tulee tehokertoimen olla yksi. Parempi ratkaisu keskijänniteverkon jännitetason hallintaan on kuitenkin jännitesäätäjä. (Repo 2005)

Tahtikoneen vakaan toiminnan raja ei ole kovin kaukana tehokertoimen arvosta yksi, joten tahtikoneen apu keskijänniteverkon jännitteenousuongelmaan on hyvin rajallinen. Jännitteen alenemaan tahtikoneen magnetointi on kuitenkin tehokas menetelmä. Koneen häviöt voitaisiin minimoida tarkkailemalla tehokertoimen lisäksi liittymispisteen jännitetasoa. Jännitteen ollessa sallituissa arvoissa kone toimisi tehokertoimen säädöllä ja ylittäessä tai alittaessa sallitut arvot siirryttäisiin jännitteensäädölle, jolloin jännitteen oloarvona käytettäisiin minimi- tai maksimiarvoa riippuen kumpi arvo saavutettiin. Liittämällä tahtikoneen rinnalle loistehon kompensointilaite saataisiin jännitetaso hyvin hallintaan. Esimerkiksi jännitteenousuongelman tapauksessa koneen rinnalle kytkettävä reaktori rajoittaisi jännitteen halutulle tasolle, jolloin tahtikone huolehtisi loistehon tai jännitteen hetkellisestä säädöstä.

(Repo 2005)

#### **4.1.3 Epätahtikoneen loistehon kompensointi**

Epätahtikoneen magnetointiin ei voida suoraan vaikuttaa, vaan kone ottaa aina magnetointivirtansa sähköverkosta. Epätahtikoneiden yhteydessä käytetäänkin yleensä loistehon kompensointikondensaattoreita, jolloin tuotantoyksikön tehokerroin säilyy kohtuullisessa arvossa. Jännitteenousuongelmaan epätahtikoneella voitaisiin soveltaa ratkaisua, missä kompensointikondensaattori kytkettäisiin pois päältä jännitteen ylittäessä

maksimiarvonsa. Tehokertoimen säätäjä tarkkailisi tehokertoimen lisäksi jännitteenmaksimiarvoa ja mikäli jännite ylittyisi, kytkettäisiin paristoja pois päältä, vaikka tehokerroin tämän seurauksena heikentyisi. Tällaisesta toimenpiteestä tulee kuitenkin erikseen neuvotella verkkoyhtiön kanssa, koska loistehon ottaminen verkosta voi muodostaa suuren kustannuksen tuotantoyksikölle. (Repo 2005)

#### **4.1.4 Tehoelektroniikka ja tuotantolaitoksen loistehon säätö**

Tehoelektroniikan avulla toteutetulla kompensattorilla, esim. STATCOM tai SVC-laitteisto, voitaisiin loistehoa säätää jatkuvasti. Mikäli tuotantolaitosta käytetään nimellisteholla eri tehokertoimella kuin yksi, täytyy tehoelektroniikkalaitteen mitoituksessa ottaa loisvirta huomioon pätövirran ohella. (Kulmala 2007)

#### **4.1.5 Tuotantolaitoksen pätötehon säätö**

Voimalaitoksen pätötehon leikkausta voidaan käyttää säätötapana, mikäli jännitteennousua tapahtuu suhteellisen harvoin ja verkon vahvistustoimenpiteet voidaan näin välttää. Pätötehon leikkaus soveltuu erityisen hyvin tuulivoimaloille, koska voimaloiden tuotantokustannukset ovat käytännössä nolla, ne sijaitsevat kaukana jäykästä sähköverkosta ja tuotanto on voimakkaasti riippuvainen ulkoisesta tekijästä eli tuulesta. Yksinkertaisin tapa tuulivoimalan tehon rajoittamiseksi on sen irtikytkeminen verkosta. (Repo 2005)

#### **4.1.6 Kuormien ohjaus**

Hajautetun sähköntuotannon tuottamaa jännitteennousua voidaan pienentää myös kasvattamalla kuormitusta. Pelkästään jännitteensäätöön näitä ei kuitenkaan kannata asentaa verkkoon, koska kuormaohjauslaitteistot ovat varsin kalliita. Muihin tarkoituksiin käytettäviä laitteita, esim. huipunleikkaukseen, voidaan kuitenkin hyödyntää myös jännitteensäädössä. (Kulmala 2007)

## 4.2 Koordinoidut jännitteensäätömenetelmät

Koordinoidulla jännitteensäätömenetelmillä tarkoitetaan menetelmiä, joissa verkkoa tai sen osaa säädetään kokonaisuutena. Yleensä koordinoiduissa jännitteensäätömenetelmissä tarvitaan tiedonsiirtoa verkon eri komponenttien kesken. Koordinoitu jännitteensäätömenetelmä vaatii tietoja verkon tilasta ja varsinkin jännitetasoista. Jännitetiedot voidaan joko mitata tai estimoida esimerkiksi käytöntukijärjestelmän tilaestimoinnin avulla. Useissa tapauksissa koordinoiduilla säätömenetelmillä voitaisiin kasvattaa hajautetun tuotannon suurinta liittymiskapasiteettia merkittävästikin.

(Kulmala 2007)

Koordinoitu jännitteensäätö perustuu joko säätölakeihin tai optimointialgoritmin käyttöön. Säätölakeihin perustuva säätö sopii parhaiten Suomen suhteellisen yksinkertaisiin verkkoihin, kun taas optimointialgoritmin käyttöä sovelletaan monimutkaisempiin verkkoihin.

(Kulmala 2007)

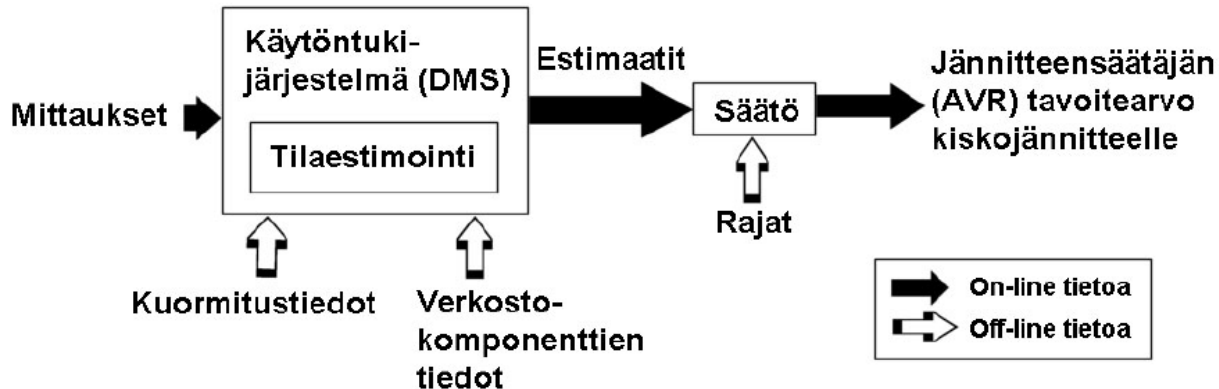
### 4.2.1 Verkon tilan seuranta ja tilaestimointi

Tilaestimointia käytetään nykyisin verkoissa, joissa on paljon asiakkaita, useita topologiavaihtoehtoja tai kun kapasiteetti on tietyissä tilanteissa rajattua. Mittaustietoa verkosta tarvitaan kuormien ennustamiseen sekä verkon tilan ja tehonjaon reaaliaikaiseen seurantaan ja ennustamiseen. Tarvittavia suureita ovat pätö- ja loisteho, virta sekä jännitetasot. Kuluttajien liittymispisteissä ei ole yleensä juurikaan mittauksia, mutta käyttäytymisen perusteella voidaan käyttää kuluttajalle tyypillisiä kuormitusmalleja. Hajautettu tuotanto on yleensä vaikeampaa ennustaa ja siksi tarvitaankin reaaliaikaista mittauksia useammasta verkon solmusta. Johtolähdön alusta katsottuna tilanne, jossa on iso kuorma ja tuotanto, näyttävät samalta kuin pieni kuorma ilman tuotantoa. Jännite voi kuitenkin johdolla ja varsinkin tuotannon läheisyydessä olla aivan erilainen. Tilaestimointiin täytyykin hajautetun tuotannon tapauksessa saada reaaliaikaista tietoa vähintään voimalan tuotannosta ja loistehosta. Mikäli jännitettä mitataan myös tuotannon liittymispisteessä, voidaan verkon tila ja tehonjako laskea varsin hyvin. Monissa tuotantolaitoksissa mitattavat suureet ovat kaukoluettavia ja verkonhaltijan käytössä. Mittauksista saatavaa tietoa voidaan suoraan käyttää jakeluverkon käytönvalvontajärjestelmässä ja koordinoidussa jännitteensäädössä. (Lemström 2005)

#### 4.2.2 Sähköaseman jännitteensäätöreleen asetusarvon säätö

Jakeluverkon jännitettä voidaan pienentää sähköaseman kisko-jännitettä alentamalla, mikäli paikallisella jännitteensäädöllä ei päästä sallitulle jännitetasolle. Yksinkertaisin koordinoitu jännitteensäätömenetelmä säätää jännitteensäätöreleen asetusarvoa jakeluverkon maksimi- ja minimijännitteen perusteella. Jännitteet voidaan joko mitata tai estimoida esimerkiksi käytöntukijärjestelmän tilaestimoinnilla. (Kulmala 2007)

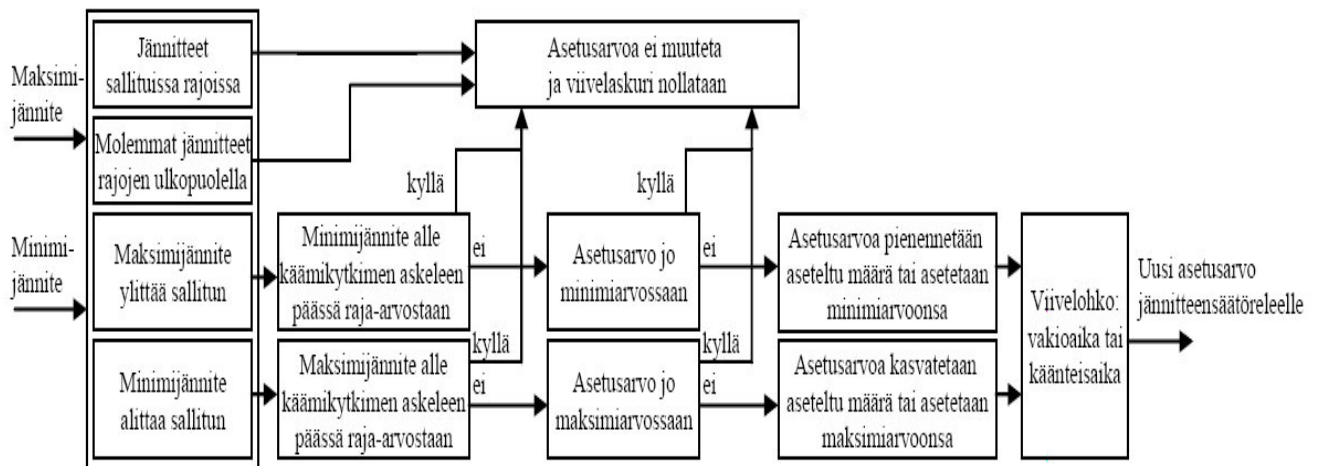
Kisko-jännitteen muuttamisen yhteydessä täytyy tarkastaa, että jännite pysyy myös muilla lähdöillä sallituissa rajoissa. Tarkistus tehdään käytöntukijärjestelmän tilaestimoinnin avulla, jolloin käytöntukijärjestelmässä yhdistetään kuormituskäyräpohjainen tehonjaonlaskenta ja sähköasemalta ja verkon muista pisteistä saadut SCADA mittaukset. Kuvassa 4.3 on havainnollistettu jännitteensäätäjän tarvitsemia tietoja. Mustilla nuolilla kuvatut mittaukset, estimaatit ja jännitteensäätäjän tavoitearvo kisko-jännitteelle ovat reaaliaikaista on-line tietoa. Muut valkoisilla nuolilla kuvatut ovat off-line tietoa verkosta ja sen ominaisuuksista. (Laaksonen 2004; Hird 2004)



Kuva 4.3. Automaattisen jännitteensäätöreleen (AVR) toiminnassa tarvitsemat tiedot. (Hird 2004)

Lähteessä (Kulmala 2007) simuloidaan sähköaseman kisko-jännitteen säätöön perustuvan koordinoitun jännitteensäätömenetelmän toimintaa suomalaisessa keskijänniteverkossa, johon liitetään 3 MW tuulivoimaa. Simulaatioissa käytettävän jännitteensäätömenetelmän toimintakaavio on kuvassa 4.4. Säätoalgoritmin sisäänmenoja ovat säädettävän verkko-osan maksimi- ja minimijännite, jotka voidaan joko mitata tai estimoida. Ulostulona saadaan jännitteensäätöreleen asetusarvo. Sääto sisältää peräkkäin kaksi kuvan 4.4.

toimintakokonaisuutta. Ensimmäinen toimii perussäätönä, jonka tarkoituksena on palauttaa verkon jännitteet sallitulle vaihteluvälille. Jälkimmäinen toimii palauttavana säätönä, joka puolestaan palauttaa jännitteet normaalitasolle tuotanto- tai kuormamuutosten seurauksena. Esimerkiksi voimalaitoksen irtikytkennän seurauksena pelkällä perussäädöllä jännitteet voisivat jäädä epätavallisen mataliksi. (Kulmala 2007)



Kuva 4.4. Tarkasteltavan jänniteensäätömenetelmän toimintakaavio. (Kulmala 2007)

Jänniteensäätöreleen asetusarvoa pienennetään kun verkon maksimijännite ylittää sallitun. Maksimijännite esiintyy yleensä sähköasemalla tai generaattorin liittymispisteessä. Vastaavasti jänniteensäätöreleen asetusarvoa kasvatetaan kun verkon minimijännite (esimerkiksi johtolähdön loppupäässä) alittaa sallitun. Jänniteensäätöreleen asetusarvoa ei muuteta mikäli molemmat sekä maksimi- että minimijännite ovat sallitun vaihteluvälin sisällä. Asetusarvoa ei myöskään muuteta tapauksessa, jossa molemmat äärijännitteet ovat rajojen ulkopuolella, koska verkon jännitteitä ei pystytä tällöin muuttamaan sallitulle välille pelkällä sähköaseman jännitteen säädöllä. (Kulmala 2007)

Asetusarvoa ei muuteta, mikäli vastakkainen äärijännite joutuisi säädön seurauksena sallitun alueen ulkopuolelle, koska tämä johtaisi käämikytkimen jatkuvaan askeltamiseen vuoroin ylös ja alas. Asetusarvoa muutetaan siis vain, jos vastakkainen äärijännite on yli käämikytkimen askeleen päässä raja-arvostaan. Algoritmissa oletetaan, että käämikytkimen askellus muuttaa koko verkon jännitteitä askelluksen verran., vaikka tämä ei täysin päde

todellisessa verkossa. Säädön jälkeiset jännitteet voitaisiin myös estimoida, mikäli kuormitusten jänniteriippuvuudet tunnetaan. (Kulmala 2007)

Seuraavaksi tarkistetaan onko asetusarvo jo ääriasennossaan. Asetusarvon ollessa ääriasennossa ei muutosta tehdä. Asetusarvon rajat on määritetty niin, että sähköaseman kiskoajännite pysyy sallituissa rajoissa. Asetusarvon  $V_{ref}$  on oltava välillä

$V_{max} - DB \geq V_{ref} \geq V_{min} + DB$ , missä  $V_{max}$  ja  $V_{min}$  ovat jännitteen maksimi- ja minimirajat sekä  $DB$  on jänniteensäätöreleen sallittu säätöpoikkeama. (Kulmala 2007)

Säätö muuttaa jänniteensäätöreleen asetusarvoa määrätyn suuruudessa askeleissa. Jos asetusarvo on kuitenkin lähempänä kuin määritetyn askeleen päässä raja-arvostaan, asetetaan asetusarvoksi maksimi- tai minimiarvo. Näin saadaan koko säätövara käytettyä.

(Kulmala 2007)

Viivelohkon avulla estetään lyhytaikaisten jännitemuutosten aiheuttamat asetusarvon muutokset. Myös jänniteensäätöreleen toiminta-aika on otettu huomioon viiveessä. Näin vältetään käännyksen turha askellus edestakaisin. (Kulmala 2007)

Tarkasteltava jänniteensäätömenetelmä toimii simuloinneissa halutulla tavalla, vaikkakaan jännitteitä ei pystytä palauttamaan sallitulle välille tilanteessa, jossa 3 MW:n voimalaitos syöttää verkkoon nimellistehonsa tehokertoimella yksi. Tässä tapauksessa voimalaitoksen loistehon kulutus pitäisi sallia. (Kulmala 2007)

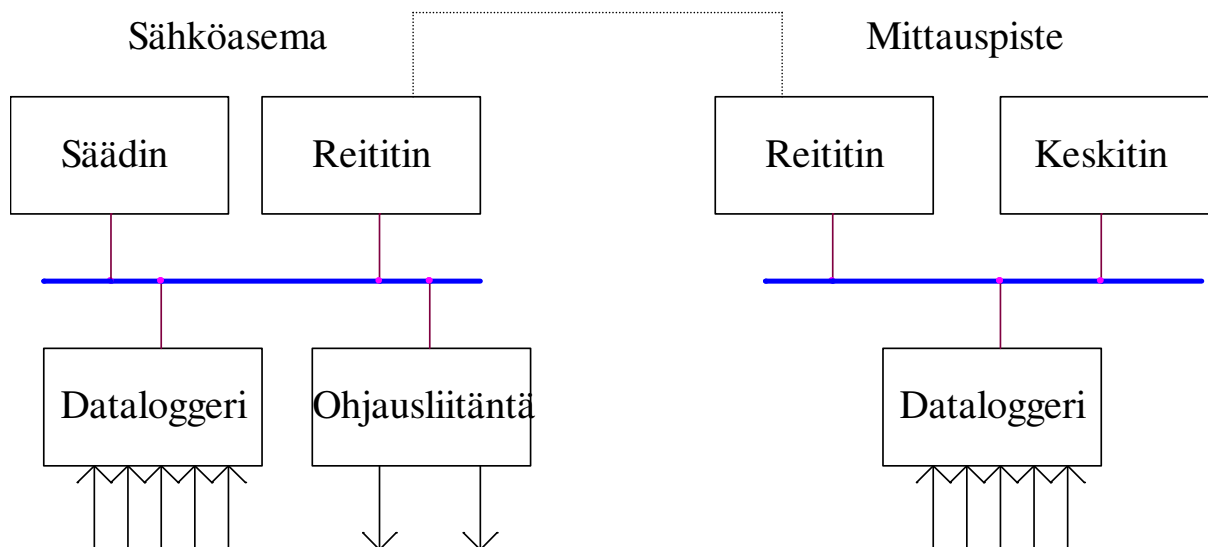
#### 4.2.2.1 GENAVC™

Econnect Ltd on kehittänyt kaupallisen ratkaisun aktiiviselle jänniteensäädölle, joka perustuu sähköaseman jänniteensäätöreleen asetusarvon koordinoituun säätöön. Estimoinnin suorittava säätäjä sisältää tilaestimoinnin toteuttavan osan sekä hieman pelkistetympään kuvan 4.5. mukaisen jänniteensäätöreleen asetusarvon määrittävän osan. Kuvassa GenAVC™ on asennettu kahden jänniteensäätöreleen rinnalle.



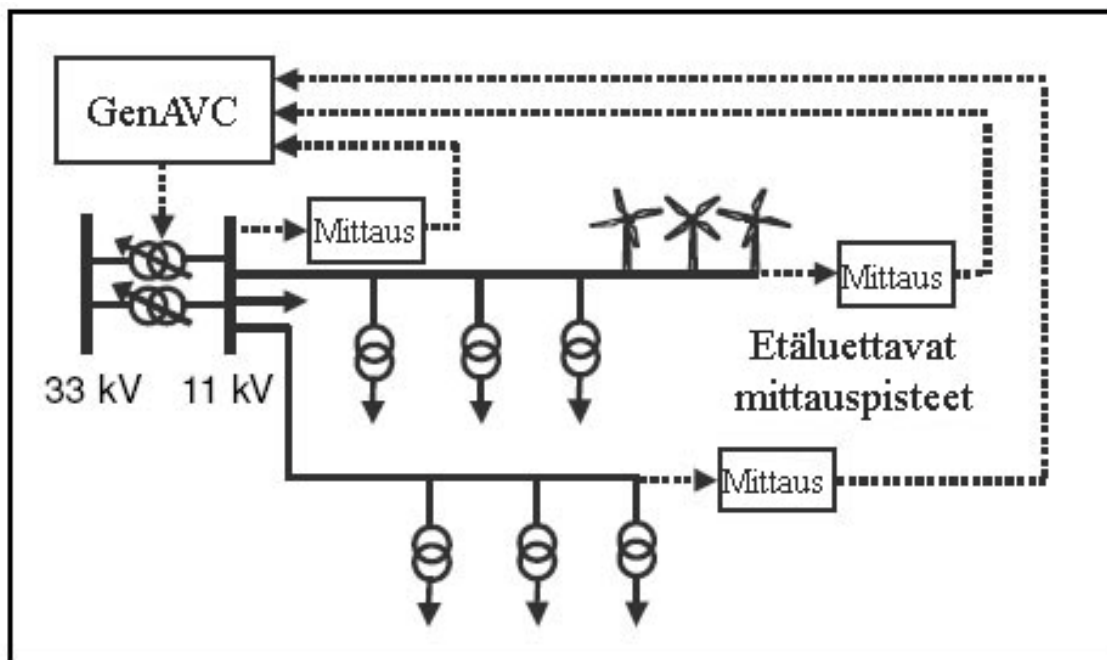
Kuva 4.5. GenAVC™ asennettuna ohjaamaan kahta jännitteensäätörelettä. (Econnect 2005)

GenAVC™ muodostuu kuvan 4.6. lohkoakaavion mukaisista komponenteista. Dataloggereilla verkon jännitteitä ja virtoja mitataan jatkuvasti päämuuntajalla ja verkon muutamissa pisteissä. Säädin käyttää verkosta reaaliaikaisesti mitattuja arvoja sekä kuormituskäyräpohjaista tehonjaonlaskentaa ja näin saadaan tilaestimointia hyväksi käyttäen jännitteet koko säädettävälle verkon osalle. Säädin pyrkii pitämään verkon jännitteet sallituissa rajoissa kaikkialla verkossa. Rajojen ylittyessä säädin antaa ohjausliitännän kautta jännitteensäätöreleelle käskyn muuttaa päämuuntajan käämikytkimen asentoa. (GenAVC 2007)



Kuva 4.6. Lohkokaavio GenAVC™:n toiminnasta. (GenAVC 2007)

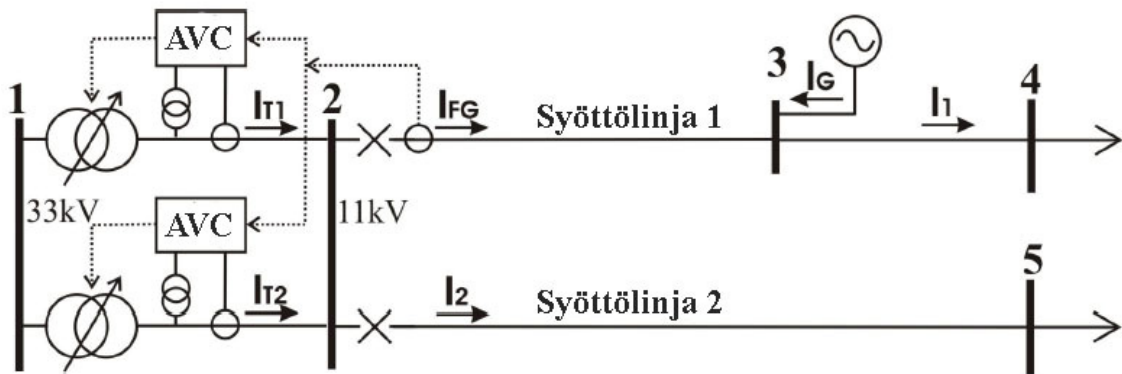
Kuva 4.7. esittää tyypillistä ratkaisua GenAVC™:n toiminnasta 11kV:n brittiläisessä jakeluverkossa, jossa on myös hajautettua tuotantoa. Kaukolukua hyväksi käyttäen mitataan verkossa olevia jännitteitä sekä kerätään tietoja tehon virtauksesta tuotantolaitoksilla. Tiedot välitetään säätäjälle joka estimoinnin avulla ohjaa käännytykintä, mikäli jännitteet eivät ole sallituissa rajoissa. (Econnect 2005)



Kuva 4.7. Esimerkki GenAVC:n toiminnasta 11kV:n jakeluverkossa, jossa on hajautettua tuotantoa. (Econnect 2005)

#### 4.2.2.2 SuperTAPP n+ jännitteensäätörele

Fundamentals Ltd:n SuperTAPP n+ jännitteensäätöreleen toiminta perustuu paikallisiin mittauksiin, joten mittauksia sähköaseman jälkeisiltä verkon osilta ei tarvita. Hyötynä tästä voidaan pitää pieneneviä kustannus- ja käyttöinvestointeja. Kuormitukset ja jännitteet verkossa tulee kuitenkin tietää. Kuvassa 4.8. on esitetty SuperTAPP n+ jännitteensäätöreleen toimintaperiaate. (Fila 2007; Fundamentals 2008)



Kuva. 4.8. SuperTAPP n+ jännitteensäätöreleen toimintaperiaate kahdella rinnakkaisella muuntajalla. (Fila 2007)

Säädön toiminta perustuu generaattorin syöttämän virran  $I_G$  estimointiin. Estimointi toteutetaan mittaamalla tuotantoa sisältävän lähdön virta  $I_{FG}$  sekä ratkaisemalla lähtöjen välinen kuormitussuhde  $E_{ST}$ .

$$E_{ST} = \frac{\text{tuotantoa sisältävän johtimen kuormitus}}{\text{ilman tuotantoa olevan johtimen kuormitus}} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_{FG}}{I_{TL} - I_{FG}}, \quad (4.1.)$$

missä  $E_{ST}$  on tuotantoa ja ilman tuotantoa olevien johtimien välinen kuormitussuhde,  $I_1$  on johtimen 1 virta,  $I_2$  on johtimen 2 virta,  $I_{FG}$  on virta tuotantoa sisältävällä lähdöllä ja  $I_{TL}$  on muuntajien yhteenlaskettu virta. (Fila 2007)

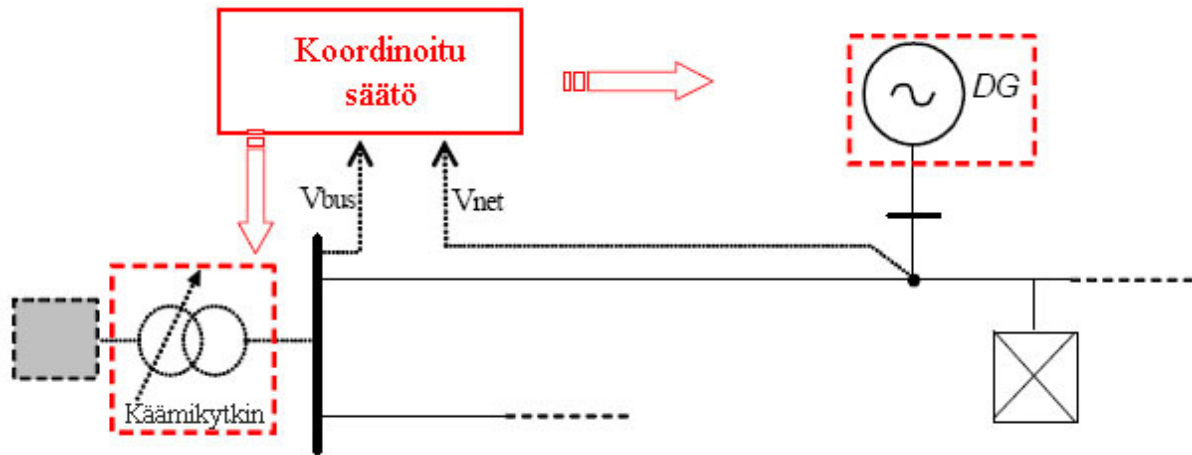
Kuormitussuhde määritetään, kun generaattori on poissa päältä. Generaattorin käydessä käytetään samaa kuormitussuhdetta generaattorin syöttämän virran  $I_G$  estimointiin.

$$I_G = (E_{ST} \cdot (I_{TL} - I_{FG})) - I_{FG} \quad (4.2)$$

Virran  $I_G$  avulla saadaan generaattorin liittymispisteessä oleva jännite arvioitua ja mahdolliset jatkotoimenpiteet jännitteensäädölle voidaan tehdä. Estimointi aiheuttaa pahimmassa tapauksessa n. 20 % virhemarginaalin. Virhe ei ole kuitenkaan suuri, varsinkin jos otetaan säädön alhaisemmat kustannus- ja käyttöinvestoinnit huomioon verrattaessa säätötapoihin, joissa tarvitaan paljon tiedonsiirtoa. (Fila 2007)

#### **4.2.3 Sähköaseman jännitteensäätöreleen ja voimalaitoksen tehokerroinsäätäjien asetusarvojen säätö**

Voimalaitoksen jännitteensäätö on huomattavasti nopeampaa kuin käämikytkimellä tapahtuva jännitteensäätö, joten loistehon säätö tapahtuu yleensä aina ennen jännitteensäätöreleen asetusarvon säätöä. Loistehon säätö voidaan ottaa myös osaksi koordinoitua säätöä, jolloin voimalaitoksen loistehoa säädetään ylemmän tason säätäjällä esim. sähköasemalta. Tällainen koordinoitu säätötapa jolla ohjataan sekä jännitteensäätöreleellä jännitettä että voimalaitoksen tehokerrointa on kuvassa 4.9. Sähköaseman ja hajautetun tuotantolaitoksen välillä tarvitaan jatkuvaa tiedonsiirtoa molempiin suuntiin. Säätöjärjestys säädettävien osien eli sähköaseman jännitteensäätöreleen ja voimalaitoksen tehokertoimen voidaan valita. (Kulmala 2007)



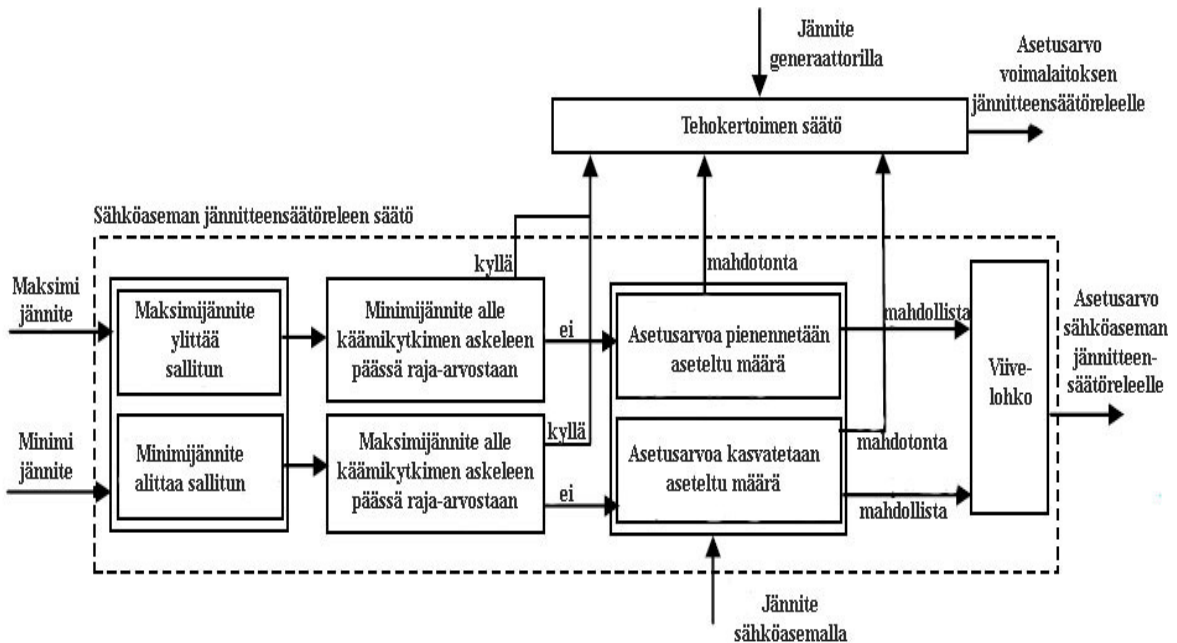
Kuva 4.9 Sähköaseman jännitteensäätöreleen ja voimalaitoksen tehokerroinsäätäjien asetusarvojen säädön periaate KJ-verkossa. (Caldon04)

Kohdassa 4.2.2. tarkasteltavaan sähköaseman jännitteensäätöreleen säätötapaan voidaan pienillä muutoksilla lisätä voimalaitosten tehokertoimen säätö. Säätölakeja tarvitaan nyt enemmän, koska säädettäviä suureitakin on enemmän. Lisäksi täytyy ottaa huomioon, että voimalaitoksen loistehon säätö vaikuttaa vain hajautettua tuotantoa sisältävään johtimeen, kun taas sähköaseman jännitteensäätöreleen säätö kaikkiin lähtöihin. Tämä monimutkaistaa suunnittelua, koska voimalaitosten tehokertoimen säätö ei ole suoraan sovellettavissa erityyppisiin verkkoihin, kuten sähköaseman jännitteensäätöreleen säätötapa. (ADINE 2008)

Nyt tarkasteltava säätöalgoritmi koostuu, kuten kohdan 4.2.2. säätötavassa, perussäädöstä ja palauttavasta säädöstä. Perussäädön tarkoituksena on palauttaa verkon jännitteet sallitulle vaihteluvälille. Palauttavalla säädöllä palautetaan voimalaitoksille yhteinen tehokertoimen asetusarvo sekä saadaan verkon jännitteet palautettua sallitulle jännitetasolle esimerkiksi voimalaitoksen irtikytkennän tapauksessa. Molempiin perus- että palauttavaan säätöön sisältyy sähköaseman jännitteensäätöreleen ja voimalaitoksen tehokertoimen säätö. Lohkojen välillä tarvitaan tiedonsiirtoa, jotta säätö toimisi halutulla tavalla. (ADINE 2008)

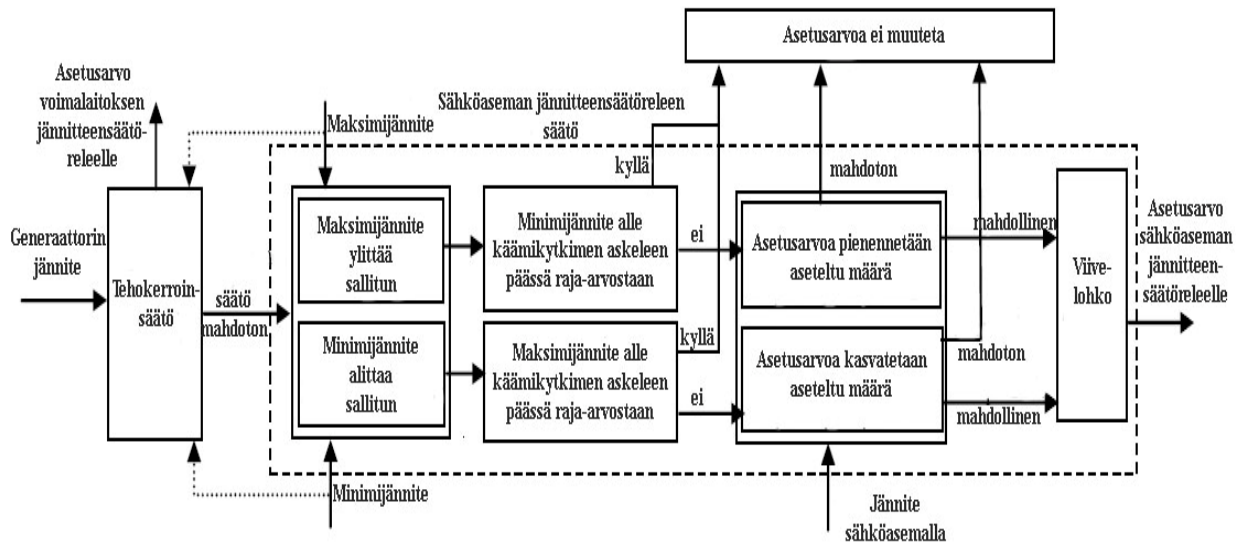
Säädön sisääntuloina käytetään säädettävän verkkoalueen minimi- ja maksimijännitettä, jännitettä sähköasemalla sekä jännitettä voimalaitoksen liityntäpisteessä. Maksimijännite on yleensä joko sähköaseman tai voimalaitoksen liityntäpisteen jännite. Minimijännite voisi olla esim. jännite johtolähdön loppupäässä heikon tuulen aikaan. (ADINE 2008)

Jännitteet voidaan joko mitata tai estimoida. Säätojärjestys voidaan toteuttaa kahdella tavalla. Ensimmäisessä tavassa säädetään sähköaseman jännitettä ensin ja tehokerroinsäätö otetaan toimintaan, mikäli jännitteitä ei saada korjattua sähköaseman käämikytkimellä, kuvassa 4.10. Tiedonsiirtoa sähköaseman ja voimalaitoksen välillä on käytettävä, jotta nopea voimalaitoksen säätö tapahtuisi vasta sähköaseman jännitteensäädön jälkeen. (ADINE 2008)



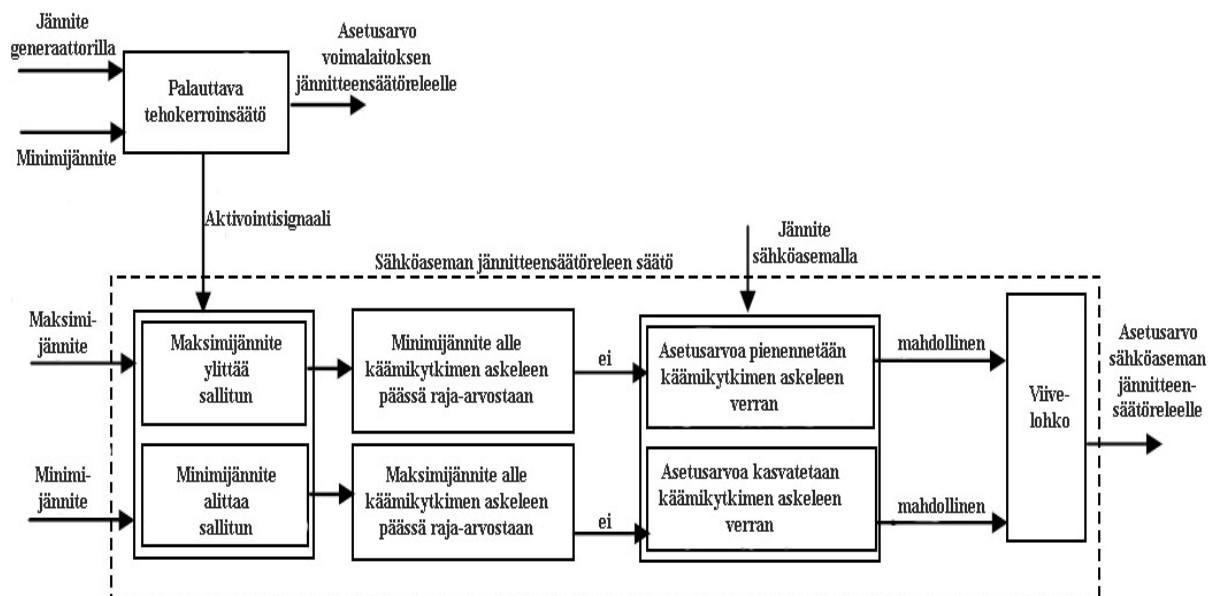
Kuva 4.10. Perussäädön toimintakaavio, kun sähköaseman jännitteensäätörelettä säädetään ensin. (ADINE 2008)

Toisessa tavassa taas ensimmäisenä säädetään voimalaitosta ja, jos voimalaitoksen säätö ei ole mahdollista siirrytään sähköaseman jännitteensäätöreleen säätöön, kuvassa 4.11. Mikäli sähköasemankin jännitteensäätö on mahdotonta, säätöä ei tehdä mihinkään suuntaan. Voimalaitoksen säätö (nopean toimintansa takia toimii aina ennen käämikytkimellä tapahtuvaa säätöä) voi toimia paikallisen mittauksen avulla, jolloin tiedonsiirtoa sähköaseman ja voimalaitoksen välillä ei tarvita. (ADINE 2008)



Kuva 4.11. Perussäädön toimintakaavio, kun voimalaitoksen tehokerrointa säädetään ensin. (ADINE 2008)

Kuvan 4.12 palauttavassa säädössä säädetään voimalaitoksen tehokerrointa aina ensin, riippumatta kumpi säätöjärjestys on käytössä perussäädössä. Palauttavassa säädössä voimalaitoksille jaetaan yhteinen tehokertoimen asetusrvo ja jännitteet verkossa palautetaan sähköaseman jännitteensäätöreleen säädöllä. Sähköaseman jännitteensäätö releen säätö on samanlainen, kuin perussäädössä, mutta jänniterajat on asetettu tiukemmiksi. Lisäksi säädössä asetetut viiveet ovat suuremmat. (ADINE 2008)



4.12. Palauttavan säädön toimintakaavio. (ADINE 2008)

Käytännön toiminnassa on varauduttava siihen, että tiedonsiirto ei välttämättä toimi kunnolla ja säätö ei saa sisääntuloina säädettävän verkon osan jännitteitä. Tällaisessa vikatilanteessa algoritmi asettaa vakio asetusarvot jännitteensäätöreleille ja mikäli generaattorin liittymispisteessä havaitaan ylijännite, irrotetaan kyseinen generaattori verkosta. (ADINE 2008)

#### **4.2.4 Optimointialgoritmit**

Optimointialgoritmit eivät määritä suoraan uusia asetusarvoja alemman tason säätäjille, vaan ulostulona algoritmista saadaan asetusarvot esimerkiksi käämikytkimen asennolle ja voimalaitosten loisteholle. Optimointialgoritmia voidaan käyttää monimutkaisten verkkojen tapauksissa, jolloin säädettäviä komponentteja on useita ja yksinkertaisten säätölakien määrittäminen vaikeaa. Optimointialgoritmin kustannusfunktio pyritään minimoimaan verkon teknisten reunaehtojen puitteissa, joten kustannusfunktiota muuttamalla voidaan vaikuttaa algoritmin ulostuloon ja säätötoimenpiteiden suoritusjärjestykseen.

Optimointialgoritmien käytännön toteutus verkon jännitteensäädössä on paljon monimutkaisempaa kuin yksinkertaisempien säätölakien. Algoritmi voi ehdottaa useita erilaisia säätötapoja ja sen täytyisi osata valita näistä kuhunkin tilanteeseen, tämä lisää säätöön kuluvaa aikaa. Säätötoimenpiteet eivät saisi myöskään muuttaa verkon toimintapistettä radikaalisti. Esimerkiksi käämikytkimen askeltamista ylös ja alas tulisi välttää. (Kulmala 2007; ADINE 2008)

## **5. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT**

Hajautetun tuotannon vaikutuksesta jakeluverkon jänniteprofiili muuttuu tehonvirtauksen muuttuessa. Jännitteen nousu tuotantoyksikön liittymispisteessä tai sähköaseman läheisyydessä voi rajoittaa jakeluverkon siirtokykyä. Nykyisin jännitteenousua rajoitetaan yleensä passiivisilla menetelmillä kuten vahvistamalla verkkoa. Tuotantolaitos ei tällöin osallistu jakeluverkon jännitteensäätöön. Tämä saattaa nostaa suurehkon tuotannon tapauksessa liittymiskustannukset niin korkeiksi, ettei tuotantolaitosta kannata rakentaa. Aktiivisilla menetelmillä, kuten käyttämällä joustavaa liityntätehoa paikalliseen

jännitemittaukseen perustuen tai koordinoitulla säädöllä, jolloin verkon useita komponentteja säädetään koordinoitusti, jännitteennousua voitaisiin rajoittaa hajautetun tuotannon tapauksissa merkittävästi.

Erilaisia aktiivisia jännitteensäätötapoja on tutkittu kirjallisuudessa useita. Monet näistä ovat Suomen olosuhteisiin nähden liian monimutkaisia ja paljon investointeja vaativia. Kommunikointiyhteyksiä tarvitseva monimutkainen säätötapa voi aiheuttaa ongelmia, jos vaikka tiedonsiirto ei toimikaan halutulla tavalla verkon säätävien komponenttien kesken.

Sähköaseman jännitteensäätöreleen säätö on sovellettavissa varsin suoraan erilaisiin verkkoihin, mutta voimalaitoksen tehokertoimen säätö täytyy tutkia tapauskohtaisesti. Sähköaseman jännitteensäätöreleen asetusarvon säätö paikallisen voimalaitoksen säätämisen jälkeen on Suomen jakeluverkoissa useasti paras ratkaisu, lisättäessä hajautettua tuotantoa verkkoon. Olemassa olevia kaukoluettavia mittauksia verkosta voidaan käyttää verkon tilan tarkempaan määrittämiseen ja jännitteensäädön parempaan toimintaan.

Tuotantolaitoksen kannattavuus ja tapa jolla tuotannon aiheuttama jännitteennousuongelma ratkaistaan, tulee tutkia tapauskohtaisesti. Ratkaisua voidaan etsiä perinteisistä passiivisista menetelmistä tai aktiivisista jännitteensäätömenetelmistä. Monesti pelkkä tuotantolaitoksen paikallinen säätö tai pelkkä sähköaseman jännitteensäätöreleen säätö ei mahdollista tuotantolaitoksen koko kapasiteetin käyttöönottoa. Liitettäessä useita megawatteja hajautettua tuotantoa jakeluverkkoon, aktiivinen jännitteensäätö voi tulla jänniteongelmissa passiivisia menetelmiä edullisemmaksi. Aktiivisen säädön tulisi kuitenkin olla helposti sovellettavissa olemassa olevaan verkkoon. Automaation lisäämisestä aiheutuvat kustannukset ja verkon säädön monimutkaistuminen eivät saisi ylittää tuotantolaitoksen tuomaa hyötyä.

**LÄHDELUETTELO**

- (ADINE 2008) ADINE Deliverable 17: Specification of coordinated voltage control application. 2008. Tampereen University of Technology. [Viitattu 6.2.2009]. Saatavilla: [http://www.sentre.fi/mp/db/material\\_folder/x/IMG/27550:16616/file/ADINE\\_D17\\_31122008\\_rev1.0.pdf](http://www.sentre.fi/mp/db/material_folder/x/IMG/27550:16616/file/ADINE_D17_31122008_rev1.0.pdf)
- (Caldon 2004) Caldon R., Turri R., Prandoni V. & Spelta S. Control issues in MV distribution systems with large-scale integration of distributed generation. Proc. Bulk Power System Dynamics and Control - VI, Cortina d'Ampezzo. 2004. pp. 583-589.
- (CODGUNet 2007) Sauli Jäntti, "Connection of Distributed Energy Generation Units in the Distribution Network and Grid", Project Acronym: CODGUNet Final report.
- (Elovaara 1988) Elovaara J. & Laiho Y. Sähkölaitostekniikan perusteet. Otakustantamo. 1988. ISBN 951-672-033-1.
- (Fila 2007) Fila M., Taylor G., Hiscock J., Irving M. & Lang P. Flexible voltage control to support Distributed Generation in distribution networks. Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International.
- (Fundamentals 2008) Fundamentals Ltd. SuperTAPP n+ voltage control relay leaflet. 2008. Fundamentals Ltd. [Viitattu 2.2.2009] Saatavilla: [http://www.fundamentalsltd.co.uk/pdfs/supertapp\\_nplus\\_leaflet2.pdf](http://www.fundamentalsltd.co.uk/pdfs/supertapp_nplus_leaflet2.pdf)

- (Econnect 2005) White S. Active local distribution network management for embedded generation. 2005. Econnect Ltd. [Viitattu 15.1.2009] Saatavilla: [http://www.econnect.com/news/Published\\_Reports/GenAVC.pdf](http://www.econnect.com/news/Published_Reports/GenAVC.pdf)
- (GenAVC 2007) Econnect Ltd. GenAVC brochure. 2007. [Viitattu 15.1.2009] Saatavilla: [http://www.econnect.com/services/Technology/0141.PGenAv1%20GenAVC%20brochure%20v1.0%20\(13%20April%202007\).pdf](http://www.econnect.com/services/Technology/0141.PGenAv1%20GenAVC%20brochure%20v1.0%20(13%20April%202007).pdf)
- (Hird 2004) Hird C., Leite H., Jenkins N. & Li H. Network voltage controller for distributed generation. 2004. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 151, pp. 150-156.
- (Janatuinen 2007) Janatuinen H. Pienvesivoimalan mallinnus ja jakeluverkkovaikutusten tarkastelu. Diplomityö. 2007. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Lappeenranta.
- (Kulmala 2007) Kulmala A. Aktiivisen jännitteensäädön soveltaminen Högsäran verkossa. ElDiG-projektin tutkimusraportti. 2007. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 46s.
- (Laaksonen 2004) Laaksonen, H. Hajautetun tuotannon tilastollisuuden ja keskijänniteverkon aktiivisen jännitteensäädön huomioiminen verkostolaskennassa. Diplomityö. 2004. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.
- (Lakervi 1995) Lakervi E. & Holmes E. Electricity Distribution Network Design, 2nd Edition. IEE power series 21. Peter Peregrinus Ltd., London. 325s. ISBN 0-86341-9

- (Lemström 2005) Lemström B., Holttinen H. & Jussila M. Hajautettujen tuotantolaitosten tiedonsiirtotarpeet ja -valmiudet. VTT Tiedotteita 2283. 2005. VTT. Espoo. 72s.  
ISBN 951-38-6529-0
- (Nordac 2004) Kauhaniemi, K., Komulainen, R., Kumpulainen, L., & Samuelsson, O. Distributed generation–new technical solutions required in the distribution system. NORDAC 2004 – Nordic Distribution and Asset Management Conference. 2004. 15 s.
- (Repo 2003) Repo S., Laaksonen H., Järventausta P. & Mäkinen A. Keski-jänniteverkon siirtokyky jännitteennousun perusteella - Högsåran tuulivoimalan tapaustutkimus. Tutkimusraportti 2003/2. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 63s. ISBN 952-15-1046-3.
- (Repo 2005) Repo S., Laaksonen H., Mäki K., Mäkinen A. & Järventausta P. 2005. Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset keski-jänniteverkossa. Tutkimusraportti 2005/3. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 169s. ISBN 952-15-1382-9.
- (SFS 2008) SFS-EN 50160. 2008. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. 28 s.
- (Vartiainen 2002) Vartiainen E., Luoma P., Hiltunen J. & Vanhanen J. Hajautettu energiantuotanto: teknologiat, polttoaineet, markkinat ja CO<sub>2</sub>-päästöt. 2002. Edita Oy., Helsinki. 90 s.

(Wade 2003)

World Alliance for Decentralized Energy. Guide to Decentralized Energy Technologies. 2003 [viitattu 1.12.2008], Saatavilla:

[http://www.energymanagertraining.com/CHPMaterial/03-report\\_de\\_technologies.pdf](http://www.energymanagertraining.com/CHPMaterial/03-report_de_technologies.pdf)

**LIITE I****Laskut kappaleen 2.4 esimerkkiin.**

15 km pituisen Raven johtimen resistanssi  $R = 8.025 \Omega$  ja reaktanssi  $X = 5.52 \Omega$ .

**Jännitteen alenema  $U_h$  generaattorin liittymispisteessä ilman tuotantoa:**

Lähtötiedot:

$$P = 0.5 \text{ MW}$$

$$U = 20.5 \text{ kV}$$

$$\cos \varphi = 0.8$$

$$\tan \varphi = 0.75$$

$$U_h = \frac{P}{U} (R + X \tan \varphi) = 296.7 \text{ V}$$

$$U_G = 20.5 \text{ kV} - 0.3 \text{ kV} = 20.2 \text{ kV}$$

**Jännitteen nousu liittymispisteessä tuotannolla 5 MW:**

$$\Delta U \approx \frac{R \cdot P_{Ng} + X \cdot Q_{Ng}}{U} = 2.16 \text{ kV}$$

$$U_G = 20.2 \text{ kV} + 2.16 \text{ kV} = 22.4 \text{ kV}$$