

Jyri Kivinen
0259957
Säte 4

KANDITYÖ
15.05.2008

Hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutukset

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta, Sähkötekniikan osasto
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin koulutusohjelma

Jyri Kivinen

Hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutukset

Kandidaatintyö

2008

39 sivua, 12 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite.

Tarkastaja: Jarmo Partanen

Hakusanat: sähköntuotanto, hajautettu, verkostovaikutukset

Tässä kandidaatintyössä on käsitelty hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutuksia eri näkökulmista. Työssä on esitelty keskeisimmät sähkötekniset vaikutukset jakeluverkkoon ja tarkasteltu vaikutuksia suojauksen, käyttövarmuuden, verkkoliiketoiminnan ja suunnittelun näkökulmasta. Tarkastelu osuuden loppuksi on esitetty yksinkertainen esimerkki pienvoimalan liittämisen vaikutuksista jakeluverkkoon. Työn loppuksi on otettu katsaus tuleviin vaikutuksiin tuotantoyksiköiden lisääntyessä jakeluverkoissa.

Hajautettu sähköntuotanto mahdollistaa paikallisten energiavarojen hyödyntämisen sähköntuotantoon jakeluverkon alueella. Tämä tarkoittaa, että siirtoetäisyydet pienenevät, jolloin häviöt saadaan minimoitua. Haittapuolena tällaisessa järjestelmässä on epävarmuus jakeluverkon ja tuotantoyksiköiden käyttäytymisestä eri tilanteissa, kuten myös jännitteen nousu. Suojauksen toimivuus on myös suuri ongelma, koska sen täytyy toimia riippumatta siitä onko voimala verkossa vai ei. Suojauksen toiminta hajautetun tuotannon yhteydessä on epävarmaa ja selvästi tällä hetkellä suurin este järjestelmän laajempaan hyödyntämiseen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of technology
Faculty of technology, department of electricity engineering
Program of Master of Science in electrical engineering

Jyri Kivinen

Power grid affects caused by distributed power generation

Bachelor's thesis

2008

39 pages, 12 figures, 4 tables and 1 appendice.

Supervisor: Jarmo Partanen

Keywords: grid, affects, generation.

This bachelor's thesis deals with the affects of power generation in distribution networks from different angles. This thesis handles the general affects from an electrical point of view and also looks at the subject in terms of network fault protection, network topology, network engineering and financial affects. At the end of the affects portion of this thesis there is also a simple example what demonstrates the affects.

A distributed energy system makes possible to use local energy resources for power production in the distribution networks area. This means that power transmission distances came shorter and this means smaller losses. The problem in this kind of system is the uncertainty of how the network behaves in different kinds of situations and also a problem is the steady-state voltage rise. Another big problem is the network fault protection wits must work regardless of the situation of the embedded generation. The fault protection is the single biggest problem that stands in the way utilising this system on a bigger scale.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|-----------|
| Käytetyt merkinnät ja lyhenteet | 4 |
| 1. Johdanto | 5 |
| 2. Hajautettu sähköntuotanto..... | 6 |
| 3. Tuotannon vaikutus jakeluverkkoon..... | 8 |
| 3.1 Jakeluverkon jänniteensäätö | 8 |
| 3.1.1 Jännitesäädön sekoittuminen..... | 8 |
| 3.2 Sähkön laatu | 9 |
| 3.3 Sähkötekniset vaikutukset..... | 9 |
| 3.3.1 Jännitteen nousu | 9 |
| 3.3.2 Jännitetason nopeat vaihtelut ja välkyntä..... | 12 |
| 3.3.3 Vikavirrat..... | 14 |
| 3.3.4 Yliaallot | 15 |
| 3.3.5 Häviöt..... | 15 |
| 3.4 Suojaus..... | 16 |
| 3.4.1 Suojauksen ongelmia..... | 17 |
| 3.5 Käyttövarmuus | 19 |
| 3.6 Verkon suunnittelu | 19 |
| 3.6.1 Suunnitteluperiaatteet..... | 21 |
| 3.6.2 Tuotannon liittämisen reunaehdot..... | 22 |
| 3.7 Verkon käyttö | 24 |
| 3.7.1 Rengaskäyttö..... | 24 |
| 3.7.2 Saarekekäyttö..... | 25 |
| 3.8 Taloudelliset vaikutukset | 26 |
| 3.9 Esimerkki pienvoimalaitoksen liittamisestä jakeluverkkoon..... | 27 |
| 4. Hajautetun tuotannon suojaus | 30 |
| 4.1 Perussuojaus | 30 |
| 4.1.1 Yli- ja alijännitesuojaus..... | 30 |
| 4.1.2 Yli- ja alitaajuussuojaus | 31 |
| 4.1.3 Ylivirtasuojaus..... | 32 |
| 5. Tulevaisuuden verkostovaikutukset | 33 |
| 5.1 Aktiivinen jakeluverkko..... | 33 |
| 5.2 Energiavaraston vaikutus verkkoon..... | 34 |
| 6. Yhteenvedo..... | 36 |
| Lähdeluettelo | 38 |

Liitteet:

Liite I

Laskut kappaleen 3.9 esimerkkiin

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Lyhenteet ja merkinnät

| | |
|-----|---|
| AC | Alternating Current, vaihtovirta |
| CHP | Combined heat and power, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto |
| DC | Direct Current, tasavirta |
| PJK | Pikajälleenkytkentä |

Muuttujat

| | |
|------------|-------------------|
| I | virta |
| P | teho |
| R | resistanssi |
| S | näennäisteho |
| U | jännite |
| ΔU | jännitteen muutos |
| X | reaktanssi |

Alaindeksit

| | |
|-----|---------------|
| f | vika |
| g | generaattori |
| h | häviö |
| K | kuorma |
| l | liittymäpiste |
| m | muuntaja |
| n | nimellinen |
| oik | oikosulku |
| v | vaihe |

1. JOHDANTO

Hajautettu sähköntuotanto avaa oven monipuoliseen ja pääsääntöisesti ympäristöystävällisenpään sähköntuotantoon kilpailukykyiseen hintaan. Hajautetussa tuotantojärjestelmässä sähkö tuotetaan lähellä kulutusta paikallisista energiavaroista, täten pienentämällä koko energiajärjestelmän kuormitusta ja parantamalla kokonaisuhyötysuhdetta. Esteenä järjestelmän laajamittaiseen käyttöönottoon on epävarmuus sähköverkon käyttäytymisestä eri tilanteissa. Olemassa oleva sähköverkko on suunniteltu siten että teho liikkuu tuotannosta kulutukseen, ensin suurjänniteverkon sitten keskijännite ja lopuksi kuluttajalle eli yhteen suuntaan. Hajautetussa järjestelmässä syntyy tilanne, jossa tehoa voi tulla myös jakeluverkosta siirtoverkkoon, mitä ei ole otettu huomioon alkuperäistä verkkoa suunniteltaessa.

Vikatilanteet ovat hajautetussa järjestelmässä monimutkaisempia, koska vikavirta kasvaa ja sitä syötetään eri suunnista ja monesta lähteestä. Tämä asettaa uudet vaatimukset suojaukselle ja komponenttien termisille kestoisuuksille. Normaalin käytön aikana ongelmaksi voi koitua jännitteen laatu tilanteessa, jossa tuotantoyksikön teho ja kytkeytyminen verkkoon vaihtelee suuresti, kuten tuulivoimaloissa.

Uusia mahdollisuuksia hajautettu sähköntuotanto avaa esimerkiksi saarekekäytön muodossa, mikä tarkoittaa tietyn verkon osan toimintaa itsenäisenä saarekkeena. Saarekekäytössä jakeluverkon osa voi toimia omillaan paikallisen tuotannon turvin. Tämän tyyppinen tuotannon hyödyntäminen nostaa käyttövarmuutta vikatilanteiden sattuessa.

Tämä kandidaatin työ on luonteeltaan kirjallisuustyö, jossa käydään läpi hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutuksia pääsääntöisesti keskijänniteverkon näkökulmasta. Työssä käsitellään keskeisimmät sähkön laatuun liittyvät vaikutukset, kuten myös vaikutus verkosto suunnitteluun, suojaukseen ja verkon käyttöön. Aihepiirin laajuuden takia asiat ovat käsitelty pääpiirteittäin, eikä tiettyihin yksityiskohtiin ole puututtu.

Hajautettu sähköntuotanto on kasvava kiinnostuksen kohde maailmalla, nousevan sähkönhinnan takia. Aiheesta on tehty ja tehdään paljon tutkimusta ja on ehdottomasti tulevaisuudessa varteen otettava ratkaisu energia tarpeisiimme.

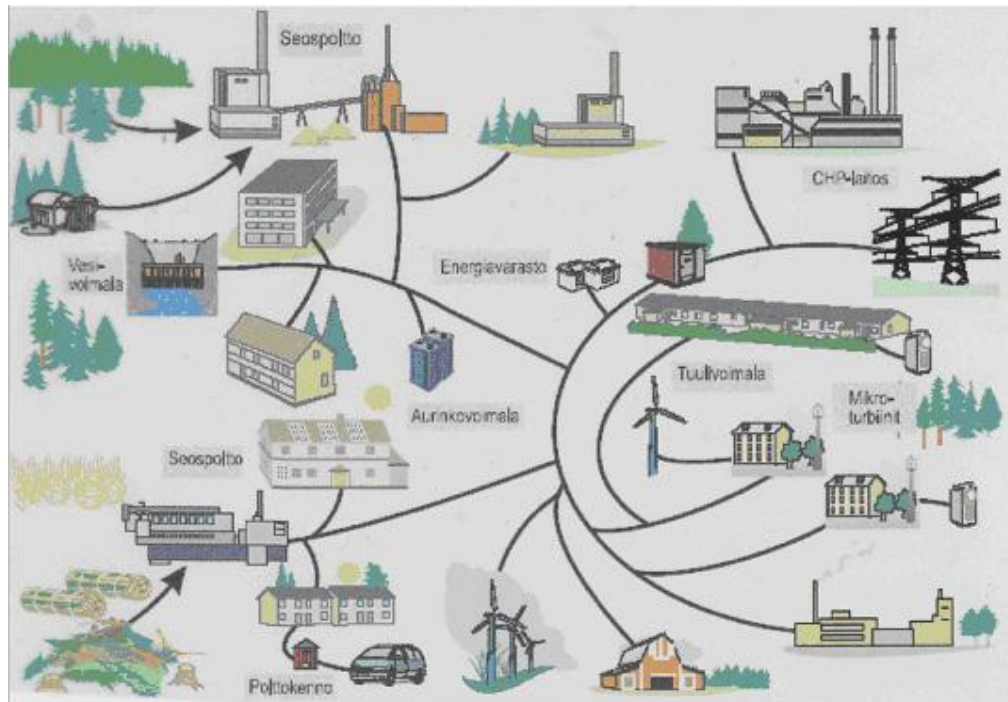
2. HAJAUTETTU SÄHKÖNTUOTANTO

Hajautettu sähköntuotanto tarkoittaa sähkön tuottamista pienissä yksiköissä hajautetusti koko sähköverkon alueella. Pääsääntöisesti tuotantoyksiköt liitetään 20 kV:n keskijännite verkkoon ja tuotantoteho vaihtelee 200 kW:n ja 10 MW:n välillä. Tämän tyyppisessä ratkaisussa on omat etunsa investointien, sähköverkon käytön ja energian saatavuuden kannalta.

Hajautettu järjestelmä mahdollistaa monipuolisen energian hyödyntämisen ja samalla kasvattaa kokonaishyötysuhdetta koko sähkönsiirtoverkossa. Syynä tähän on muualta siirrettävän tehon väheneminen, mikä vähentää siirtohäviöiden suuruutta.

Hajautettu sähköntuotanto ei koostu pelkästään uusiutuvista energianlähteistä kuten moni saattaa kuvitella, koska mediassa keskustelu painottuu suurelta osalta pelkästään tuulivoimaloiden käsittelyyn. Hajautetussa järjestelmässä tuotanto voi koostua niin CHP laitoksista kuin tuulivoimastakin. Merkittäviä energianlähteitä ovat pienet kosket ja joet, joihin voidaan rakentaa pienvesivoimaloita, kuten myös bioperäistä polttoainetta hyödyntävät CHP laitokset. Tuotannossa mukana tulee tulevaisuudessa olemaan myös aurinkovoima ja polttokennot pienessä mittakaavassa, kuten myös erilaiset energiavarastot. Kuvassa 2.1 on havainnollistettu kuinka monipuolinen hajautettu järjestelmä voi parhaimmillaan olla.

Taloudellisesta näkökulmasta hajautettu sähköntuotantojärjestelmä avaa uudet mahdollisuudet uusien sähköntuottajien tulemisesta verkkoon. Tämä siksi, että tuotantolaitokset ovat pienikokoisia eli niiden investointikustannukset jäävät suhteellisen pieniniksi verrattuna keskitettyyn sähköntuotantoon, missä laituskoot alkavat vasta 100 MW:n lukemista. Pienvoimaloiden etuna tulee olemaa myös modulaarisuus eli laitokseen voidaan tarvittaessa liittää lisää kapasiteettia myöhemmin ilman suurempia muutoksia alkuperäiseen yksikköön. Tällainen ratkaisu mahdollistaa tuotantokapasiteetin kasvattamisen tarpeiden mukaan tulevaisuudessa.



Kuva 2.1. Hahmotelma hajautetusta sähköntuotannosta. (Lakervi 2007)

Kuvasta 2.1 voidaan nähdä hajautetun energiajärjestelmän monipuolisuus, missä sähköä tuotetaan paikallisista energiavaroista. Hakkuujätteet metsistä poltetaan seospoltto laitoksissa, pienet joet hyödynnetään rakentamalla pienvesivoimaloita, paikallinen tuuli energia otetaan käyttöön suurilla tuuliturbiineilla ja kulutuspaikoissa olevilla mikroturbiineilla. Järjestelmään kun liitetään vielä energiavarastot niin kyseinen jakeluverkko alkaa olla lähes omavarainen sähköntuotannon suhteen.

Hajautetun sähköntuotannon pääajatuksena on hyödyntää kaikki paikalliset energiavarat ja tehdä jakeluverkoista omavaraisempia ja näin vähentää sähkönsiirtotarvetta. Pienvoimalaitokset pääsääntöisesti tulevat hyödyntämään uusiutuvia energianlähteitä, mutta fossiilisia polttoaineita hyödyntäviä laitoksia voidaan käyttää myös. Sähkön hinnan kasvaessa tulee oman sähkön tuottamisesta aina houkuttelevampi vaihtoehto energiayhtiöille.

3. TUOTANNON VAIKUTUS JAKELUVERKKOON

Hajautettu sähköntuotanto tulee sijoittumaan pääsääntöisesti 20 kV:n keskijänniteverkkoon ja osa pienjänniteverkkoon. Näin ollen on järkevintä tarkastella uuden tuotannon vaikutusta juuri jakeluverkon näkökulmasta. Sähköntuotannon sijoittaminen jakeluverkkoon vaikuttaa verkon sähkön laatuun, vikoihin, käyttöön ja suunnitteluun.

3.1 Jakeluverkon jänniteensäätö

Jakeluverkon jänniteensäätö on täysin passiivista sähköaseman päämuuntajan jälkeen. Päämuuntaja säätää jakeluverkon jännitettä muuntosuhdettaan muuttamalla käämikytkimen avulla. Käämikytkin mahdollistaa jänniteensäädön $\pm 15 \%$ ja säätö tapahtuu automaattisesti jakeluverkon kuormituksen mukaan. Tämän jälkeen aktiivista säätöä ei ole ja juuri tästä syystä pienvoimalan sijoittamisesta jakeluverkkoon syntyy erilaisia ongelmia liian korkeiden jännitteiden kanssa. (Elovaara 1988)

Jakeluverkossa pienjänniteverkon jännitettä säädetään jakelumuuntajan väliottokytkimen avulla, minkä asentoa ei voida muuttaa kuormituksen alaisena. Väliottokytkin on asetettu siten että asiakkaan jännite pysyisi tiettyjen rajojen sisällä kuormituksesta riippumatta. Väliottokytkimen mahdollistama säätö on $\pm 5 \%$. (Elovaara 1988)

3.1.1 Jänniteensäädön sekoittuminen

Normaalilanteessa keskijänniteverkon jännitettä säädetään aiemmin mainitun $\pm 15 \%$ verran päämuuntajan käämikytkimen avulla. Käämikytkin säätää jännitettä mittaamalla joko sähköaseman kiskon jännitettä tai johtolähtöjen kuormitusvirran aiheuttamaa jännitteen alenemaa. Juurikin kuormitusvirtaan perustuva kompondisäätö voi toimia virheellisesti, kun sähköntuotantoa lisätään johtolähdölle. Johtolähdöllä sijaitseva pienvoimalaitos pienentää kuormitusvirran tarvetta sähköasemalta korvaamalla itse kulutusta lähdöllä ja tästä aiheutuu virhe kuormitusvirta jänniteensäädössä. Säätäjä havaitsee, että jännite on korkealle, koska kuormitusvirta on pieni ja säätää päämuuntajan käämikytkintä, mistä seuraa, että viereinen johtolähtö kokee suurenkin jänniteenaleneman, missä ei ole omaa tuotantoa. (Laaksonen 2004)

3.2 Sähkön laatu

Sähkön laadulla tarkoitetaan jakelujännitteen ominaisuuksia, joita ovat taajuus, suuruus, nopeat jännitemuutokset, aaltomuoto, kolmivaihejännitteen symmetria, keskeytykset ja erilaiset häiriöt. Edellä mainittuihin ominaisuuksiin vaikuttavat sekä tuotantoyksiköt että jakeluverkon sähkötekniset ominaisuudet. Hajautetulla tuotannolla voi tapauskohtaisesti olla positiivinen tai negatiivinen vaikutus sähkön laatuun.

Standardi SFS-EN 50160 käsittelee arvoja ja reunaehtoja joiden sisällä asiakkaalle tuleva jännite tulisi olla. Jännite arvioidaan 10 minuutin tehollisarvojen keskiarvoa ja tämä pitää jakelujännitteellä olla nimellisjännitteestä ± 10 %. Tämä arvo koskee pienjännite- ja keskijänniteasiakkaita.(SFS)

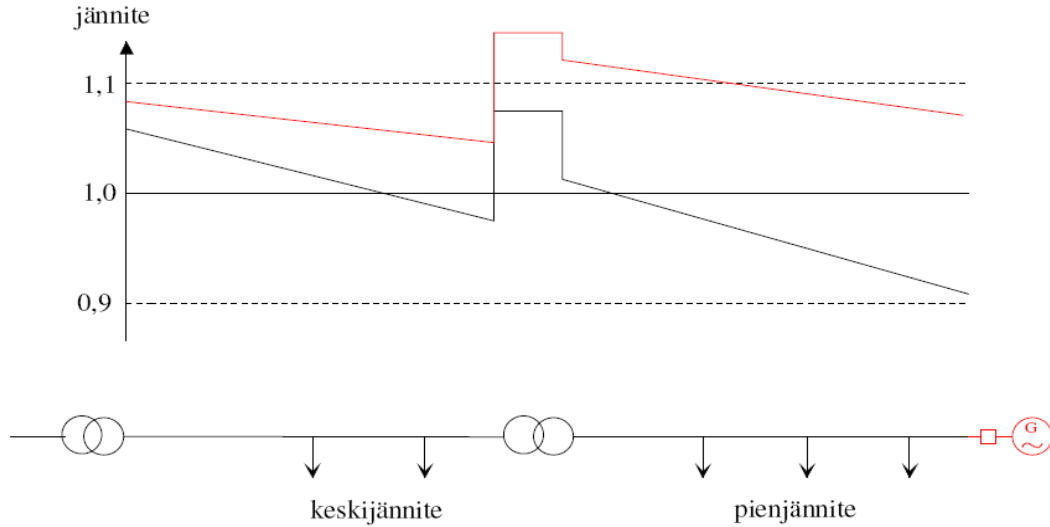
Standardi käsittelee myös sähkönlaadun kannalta tärkeitä ominaisuuksia, joille ei ole annettu tiukkoja ehtoja kuten jännitekuopat, keskeytykset ja ylijännitteet. Suunniteltaessa pienvoimalaitoksen sijoittamista verkkoon on huomioitava kaikki mainitut laatumääräykset ja suositukset. (Repo 2005)

3.3 Sähkötekniset vaikutukset

Sähköntuotannon sijoittaminen jakeluverkkoon aiheuttaa muutoksia jännitteissä, kuormitusvirroissa ja vikavirroissa. Jakeluverkon toimivuuden kannalta on oleellista, että kaikki vaikutukset tiedostetaan ennen laitoksen varsinaista liittämistä verkkoon.

3.3.1 Jännitteen nousu

Jakeluverkossa, missä ei ole tuotantoa, jännite on minimissään johtolähdön kaukaisimmassa pisteessä maksimikuormituksen aikana ja vastaavasti maksimissaan päämuuntajalla minimikuormituksen aikana. Tilanne muuttuu, kun lähdölle sijoitetaan sähköntuotantoa, jolloin päämuuntajan kokema jännite ei olekaan suurin johtolähdön kokema jännite kuten aiemmin. Suurin johtolähdöllä vaikuttava jännite voi hajautetun sähköntuotannon tapauksessa olla löydettävissä tuotannon liityntäpisteestä kuvan 3.1 mukaisesti tilanteesta riippuen. (Repo 2003)



Kuva 3.1. Pienvoimalan aiheuttama jännitteennousu. Ylempi viiva on tuotannon kanssa ja alempi ilman. (Lakervi 2007)

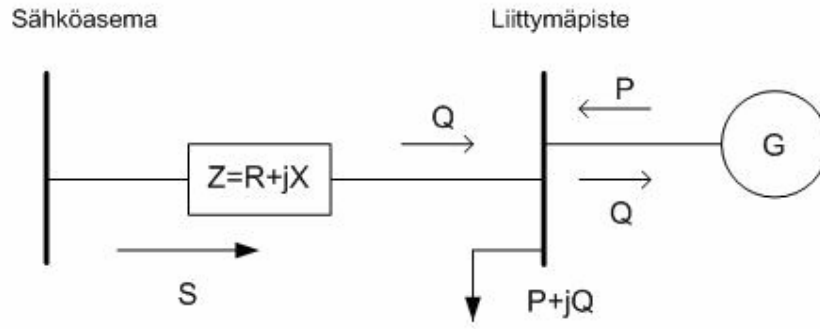
Liittymäpisteessä tapahtuva jännitteen muutos voidaan likimääräisesti laskea

$$\Delta U \approx \frac{R_{\text{oik}} \cdot P_{\text{Ng}} + X_{\text{oik}} \cdot Q_{\text{Ng}}}{U_1}, \quad (3.1)$$

missä R_{oik} on verkon oikosulkuresistanssi, P_{Ng} on generaattorin nimellispätöteho, X_{oik} on verkon oikosulkureaktanssi, Q_{Ng} on generaattorin nimellisoisteho ja U_1 on liittymäpisteen pääjännite.

Kuten kappaleessa 3.1 todettiin, jakeluverkolla jännitesäätö on passiivista. Tästä voi aiheutua jännitteen vaarallinen kasvaminen kuormituksen ollessa vähäistä suuren tuotantotehon aikana johtolähdöllä, missä tuotantoyksikkö sijaitsee. Tämä ongelma koskee erityisesti tuulivoimaloita joiden tuotantoteho vaihtelee suuresti ja yksittäisen voimala yksikön koko voi olla jopa 5 MW. CHP, vesivoima ja muut tasaiseen tehon tuotantoon kykenevät laitokset eivät ole niinkään suuri ongelma ennustettavuuden takia.

Tuotantoyksikön vaikutus samassa liittymäpisteessä olevaan kulutukseen on myös huomioitava. Tuotantoyksikön liityntäpisteessä oleva jännitteen nousu voidaan johtaa yhtälön (3.2) mukaan, kun mukana on kuormitusta samassa pisteessä.



Kuva 3.2. Tuotantoyksikön aiheuttama tehonvirtauksen muuttuminen.

$$S = P_G - jQ_G - P_K - jQ_K = U_1 \cdot I^* , \quad (3.2)$$

missä S on siirrettävä näennäisteho, P_G on generaattorin pätöteho, Q_G on generaattorin tarvitsema loisteho, P_K on kuormituksen pätöteho, Q_K on kuormituksen tarvitsema loisteho, U_1 on liittymäpisteen jännite ja I johdolla kulkeva virta.

Siirrettävän näennäistehon yhtälöstä (3.2) johtamalla saadaan jännitteen muutos kuormitetussa liittymäpisteessä

$$\Delta U = \frac{(P_G - P_K)R - X(Q_K + Q_G)}{U_1^*} .$$

Kuten huomataan kuvasta 3.2, että loistehoa joudutaan siirtämään sähköasemalta generaattorille ja kulutukselle. Generaattorin tarvitsema loistehontarve vaihtelee generaattorityypeittäin ja voi olla mahdollista, että loistehoa tuotettaisiin itse kohteelle kondensaattoreiden avulla. Tällä hetkellä suosituksena hajautetussa tuotannossa käytettyjen pienvoimaloiden tehokertoimesta on yksi ja näin vältetään loistehon siirtämisen tarve. (Nigel 2002; Repo 2005)

Pienvoimalan loistehon kompensoinnin puuttuessa on huomioitava loistehon siirtämisen vaikutukset. Loistehon siirtäminen jakeluverkon kautta tuotantoyksiköille kasvattaa häviöitä erityisesti jakelumuuntajassa, missä tuotantoyksikön puoleinen jännite putoaa loistehokomponentin IX_m vaikutuksesta. (Janatuinen 2007)

Jännitteen nousua voidaan rajoittaa pienentämällä siirtävän linjan impedanssia, joko vaihtamalla johto paksumpaan tai fyysisesti siirtämällä tuotantoyksikköä lähemmäksi sähköasemaa. Tuotantoyksikön tuotantotehoa rajoittamalla voidaan myös vaikuttaa jännitteen nousuun ja tästä voi seurata rajoitukset johtolähdölle rakennettavien tuotantoyksiköiden maksimi tuotantotehosta. (Janatuinen 2007)

Tasaiseen tuotantotehoon kykenevästä laitoksesta on hyötyä monella tavoin johtolähdölle. Sijoittamalla tällainen laitos johtolähdön loppupäähän, jännite nousee alkupään tasolle tai yli alkuperäisen syöttöjännitteen. Näin ollen, voidaan johtorakennetta muuttaa kevyemmäksi johtolähdöllä, missä pienvoimala sijaitsee. Ehtona on, että voimalaitos kykenee tuottamaan tehoa myös maksimikuormituksen aikana ja tätä ehtoa esimerkiksi tuulivoimala ei pysty täyttämään. (Lakervi 2008)

3.3.2 Jännitetason nopeat vaihtelut ja välkyntä

Pienvoimalan kytkeytyminen tai irtikytkeytyminen verkosta suuren tuotantotehon aikana aiheuttaa jännitetason nopean yksittäisen muutoksen. Tämän toistuessa useita kertoja tietyn ajan sisällä voidaan puhua välkynnästä. Välkyntä on otettava huomioon hajautetussa sähköntuotanto järjestelmässä ja on havaittavissa valojen ”välkynnästä”. Nopeata jännitetason vaihtelu ja välkyntää aiheuttavat erityisesti tuulivoimalat, koska generaattorin tuottama teho on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin. Kokemuksen perusteella tuulen nopeus voi vaihdella huomattavasti pienessäkin ajassa, tuulen puuskaisuuden takia. Jolloin voimala kytkeytyy ja irtikytkeytyy satunnaisesti. Ihmisellä 10 Hz:n taajuudella tapahtuva välkyntä on kaikkein häiritsevintä. (Repo 2003)

Pienvoimalaitoksen kytkeytyessä verkkoon tapahtuu jännitemuutos ja tämä muutos ei saa ylittää tiettyä arvoa. Kytkeytymisilmiö rajoittaa verkkoon kytkettävän pienvoimalaitoksen tehoa, mikä riippuu jakeluverkon oikosulkutehon suuruudesta. Sähköenergiailiitto on antanut 4 % suosituksen jännitetason muutoksesta kytkettäessä voimalaitosta verkkoon, mitä tulisi käyttää suunniteltaessa pienvoimalan sijoittamista jakeluverkkoon.

Pienvoimalaitoksen kytkeytymisestä aiheutuva jännitteen muutos voidaan laskea

$$\Delta U = i_{\text{suhde}} \cdot \frac{S_n}{S_{\text{oik}}} \cdot U_v, \quad (3.3)$$

missä ΔU on jännitteen muutos, i_{suhde} on voimalan kytkentävirrann suhde nimellisvirtaan, S_n on voimalan nimellijännite, S_{oik} on liitettävän verkon oikosulkuteho ensimmäisessä yhteisessä pisteessä ja U_v on verkon vaihejännite.

Tästä saadaan johdettua

$$S_{\text{oik}} = i_{\text{suhde}} \cdot S_n \cdot \frac{U_v}{\Delta U}, \quad (3.4)$$

koska tiedetään, että jännitteen muutos saa olla 4 % voidaan kirjoittaa

$$\frac{\Delta U}{U_v} = 0.04 \Rightarrow \frac{U_v}{\Delta U} = 25,$$

sijoittamalla saatu vaihejännitteen ja jännitteen muutoksen suhde kaavaan 3.4 saadaan

$$S_{\text{oik}} \geq i_{\text{suhde}} \cdot S_n \cdot 25,$$

mistä voidaan huomata, että kytkeytymisvirransuhde vaikuttaa suuresti liitettävän pienvoimalaitoksen tehon suuruuteen. Kytkeytymisvirransuhde on epätahtigeneraattoreilla luokkaa 3-8, mutta tätä voidaan pienentää niin sanotuilla pehmokäynnistimillä, jonka ansiosta i_{suhde} saadaan pidettyä jopa alle yhden. (SENER 2001)

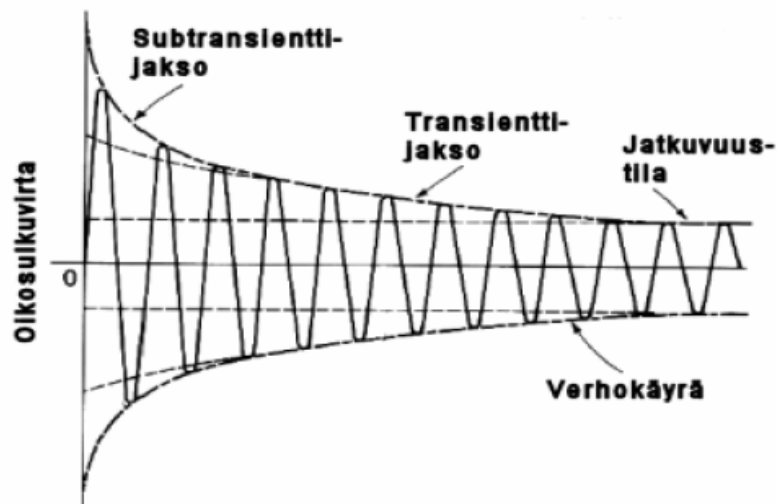
Huomataan, että liittymispisteen oikosulkutehon ylittyminen on merkittävä rajoittava tekijä jännitteen nousu ongelman kanssa suunniteltaessa pienvoimalaitoksen liittämistä jakeluverkkoon.

3.3.3 Vikavirrat

Nykyiset jakeluverkot ovat mitoitettu siten että minimoidaan kustannukset eli ylimitoitusta ei saisi tapahtua. Tästä seuraa, että vikavirtakestoisuus on olemassa olevalla verkolla juuri riittävä sen nykyisen toiminnan kannalta. Pienvoimalan lisääminen kasvattaa vikavirtoja ja tästä voi muodostua este yksikön sijoittamisella, ellei haluta investoida verkon vahvistamiseen. Vikavirtojen muuttumisesta aiheutuu myös suojaukselle erilaisia ongelmia, mitä käydään läpi kappaleessa 3.4 (Mäki 2004)

Vikavirtalähteinä toimivat pienvoimaloiden eri generaattorityypit käyttäytyvät eritavalla toisiinsa nähden vikatapauksissa, mikä on otettava huomioon suojausta suunniteltaessa.

Tahtigeneraattorin oikosulku tilanteessa syntyvä ylivirta-aalto jaetaan subtransientti, transientti ja jatkuvuustilaan kuvan 3.3 mukaan. Oikosulkuvirta on suurimmillaan alkuhetkellä, jonka jälkeen se vaimenee nopeasti.



Kuva 3.3. Tahtigeneraattorin aiheuttama oikosulkuvirta (Mäki 2004).

Tahtigeneraattorin tapauksessa alkuoikosulkuvirta on luokkaa 5-7.5 kertaa nimellisvirta ja transientti jakson aikana 3.5- 4.5-kertainen. Jatkuvuustilassa laskee virta lähelle generaattorin nimellisvirtaa jos vika pitkittyy. Suojauksen toiminnan kannalta on tärkeää, että vikavirta ei pienene liian nopeasti, koska ne perustavat virran arvoihin tietyn aikarajoin. On siis tärkeää, että vikavirta ei pääse pienenemään liikaa, koska muuten se

jäisi huomaamatta. Tästä johtuen generaattorin oikosulkumagnetointi alkaa syöttää vikavirtaa ja nostaa sen nimellisvirtaa suuremmaksi (Mörsky 1994).

Oikosulku tilanteen aikana generaattorin pyörimisnopeus kasvaa kuten myös vaihe-ero verkkoon nähden. Tämän seurauksena vian poistuttua tapahtuu virtapiikki, joka voi olla jopa 10-kertainen nimellisvirtaan verrattuna. (Mäki 2004)

Suuret tahtigeneraattorit määräävät verkon oikosulku luonteen vaikuttavat pienemmät epätahtigeneraattorit myös vikavirtoihin. Kolmivaiheisen oikosulun tapauksessa epätahtigeneraattorin magnetointi ei saa riittävästi loistehoa ja vikavirta tipahtaa nopeasti, jopa 0.2 sekunnissa. Eli epätahtigeneraattori ei pysty syöttämään vikavirtaa kolmivaiheisen vian aikana, mutta kykenee syöttämään sitä epäsymmetrisen vian aikana. Epäsymmetrisen vian aikana alkutilan vikavirta on luokkaa 3- 8-kertaisia nimellisvirtaan, mikä on samaa luokkaan kuin käynnistysvirrat. Muutostilassa virrat ovat 2- 6-kertaisia nimellisvirtaa nähden ja vian poistuessa koetaan kymmenkertainen virtapiikki nimellisvirtaan nähden. (Janatuinen 2007)

3.3.4 Yliaallot

Harmoninen yliaalto on sinimuotoinen jännite, mikä on normaalin 50 Hz verkko taajuuden monikerta. Yliaalto lähteitä voi hajautettua tuotantoa sisältävässä verkossa olla useita, koska tehoelektroniikka synnyttää niitä ja taajuusmuuttajat ja suuntaajat ovat juuri näitä. Ne aiheuttavat verkkoon häviöitä ja ylikuormittavat muuntajia ja muuntajien lämpenemisen seurauksena sen piirissä olevien laitteiden kuormitettavuus laskee.

3.3.5 Häviöt

3-vaihejohtinten häviöteho on vahvasti riippuvainen virran arvosta, kuten yhtälöstä (3.5) nähdään.

$$P_h = 3I^2R, \quad (3.5)$$

missä I on virta ja R on johtimen resistanssi.

Lisäämällä sähköntuotantoa johtolähdölle korvaa se kapasiteettinsa verran kuormaa kyseisellä johtolähdöllä. Tästä seuraa, että kuormitusvirrat pienenevät, koska samaa virtaa syötetään kahdesta eri lähteestä. Myös välimatkat pienentyvät virralla eli resistanssi johtimissa on myös pienempi. Näiden vaikutuksien seurauksena häviöt pienentyvät johtolähdöllä ja saman periaatteen mukaisesti myös koko sähkönsiirtoketjussa.

Häviöt jakeluverkossa eivät aina pienene, sillä jos pienvoimalaitos joudutaan sijoittamaan paikkaan, mihinkä tarvitaan rakentaa uutta johdinta huomattavan matkan. Koska uutta johdinta on jouduttu rakentamaan, on resistanssin määrä kasvanut ja häviöt eivät välttämättä pienene laisinkaan. Mutta tässäkin tapauksessa energian tarve kantaverkosta pienenee silti.

3.4 Suojaus

Säteittäisesti käytetty jakeluverkko on suojauksen toteutuksen kannalta suhteellisen suoraviivaista, koska päämuuntaja syöttää johtolähtöä, missä sijaitsevat jakelumuuntajat syöttävät kulutus pisteitä. Tästä seuraa, että teho kulkee aina sähköasemalta kohti kuluttajaa. Tällaisessa tilanteessa vikavirta kulkee myös yhteen suuntaan ja viallinen johtolähdön osa voidaan erottaa vikavirtamittauksen avulla irti lähdöstä.

Sijoittamalla jakeluverkkoon sähköntuotantoa muuttuu tehon virtaus ja tätä kautta syntyy vikavirralla uusia lähteitä. Vikavirtalähteitä ovat tuotantoa sisältävällä johtolähdöllä syöttävät päämuuntajat ja kaikki pienvoimalaitokset. Tästä seuraa että lähdön suojaus ei välttämättä toimi kuten on suunniteltu, koska vikavirtojen suuruudet ja suunnat ovat muuttuneet. Ongelman korjaamiseksi on lähdön suojausasetuksia muutettava, mutta uudeksi haasteeksi muodostuvat suojauksen toiminta tilanteessa, jossa lähdöllä olevat tuotantolaitokset ovat kytketty irti. Tällaisessa tilanteessa suojauksen tulisi toimia kuten alkuperäisessä tilanteessa, jolloin pienvoimaloita ei ollut lähdöllä. (Repo 2005)

Kaikki lähdön kytkentätilanteet on tarkasteltava suojauksen näkökulmasta, jotta sen toimivuus voidaan taata koko verkon alueella. Tärkeitä huomioitavia asioita ovat:

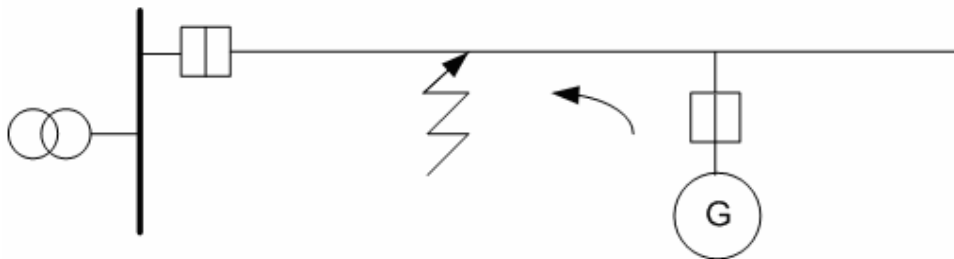
- johtojen ja komponenttien oikosulkukestoisuudet
- lähdön suojauksen havahtuminen erilaisissa vikatilanteissa
- pienvoimalan toiminta jälleenkytkennän yhteydessä

- pienvoimalan aseman kautta viereiselle lähdölle syöttämä vikavirta
- jännitekuopat ja niiden voimalalle aiheuttamat häiriöt
- varasyöttötilanteet (Repo 2005)

3.4.1 Suojauksen ongelmia

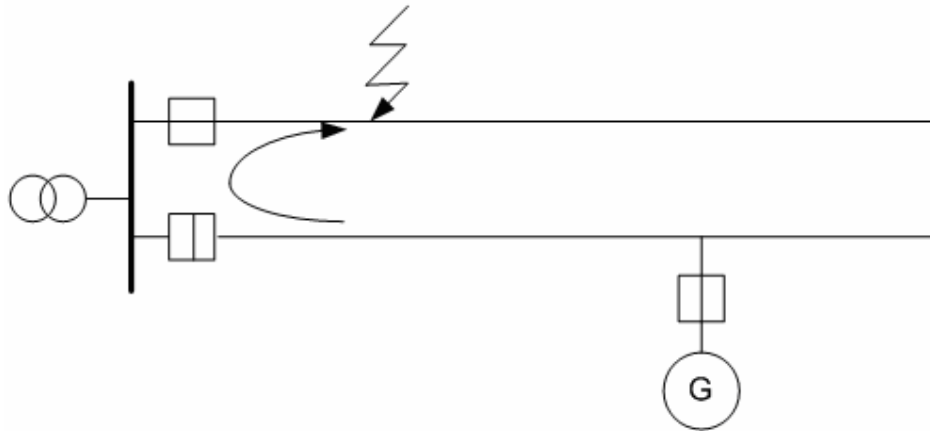
Yleisimpiä ongelmatapauksia suojauksen toimivuuden suhteen ovat jälleenkytkennän epäonnistuminen, tuotantoyksikön tarpeeton erottaminen ja johtolähdön ylivirta suojauksen toiminnan sekoittuminen. Kaikki edellä mainitut tapaukset tulee ottaa huomioon kun suunnitellaan tuotantoyksikön sijoittamista johtolähdölle.

Jälleenkytkennän epäonnistuminen tapahtuu, kun vikatilanteessa sähköaseman suojaus automatiikka yrittää suorittaa vikaantuneelle lähdölle pikajälleenkytkennän. Normaalisti vian aiheuttama valokaari saataisiin sammumaan tällä tavalla, mutta tilanteessa jossa vikaantuneella lähdöllä on pienvoimala, alkaa voimala syöttää vikavirtaa vialle, jolloin vika ei ole poistunut, kun lähtö kytketään takaisin. Johtuen pienvoimalan pienestä tuotantotehosta voi sen syöttämä vikavirta olla niin pieni ettei sen oma ylivirta suojaus havahdu lainkaan. Tapaus on havainnollistettu kuvassa 2. (Mäki 2004; Repo 2005)



Kuva 3.4. Jälleenkytkennän epäonnistuminen tilanteessa missä vioittuneella lähdöllä on sähköntuotantoa ja se pitää valokaaren yllä PJK:n aikana, jolloin PJK epäonnistuu.

Terveen johtolähdön tarpeeton erottaminen tapahtuu, kun lähdöllä on pienvoimala ja viereiseen lähtöön tulee vika lähelle sähköasemaa. Tässä tilanteessa terveen lähdön voimalaitos alkaa syöttää vikavirtaa viereisellä lähdöllä olevaan vikaan sähköaseman kiskoston kautta ja laukaisee voimalalähdön suojauksen. Tilanne on havainnollistettu kuvassa 3.5. (Mäki 2004; Repo 2005)



Kuva 3.5. Terveen lähdön irtikytkentä tilanteessa missä viereinen johtolähtö vikaantuu ja terveellä lähdöllä oleva pienvoimalaitos alkaa syöttää vikaa sähköaseman kautta.

Johtolähdön ylivirtasuojaus voi lakata toimimasta oikein tilanteessa missä johtolähdöllä on pienvoimalaitos mikä sijaitsee sähköasemasta katsottuna kaukana. Tällaisessa tilanteessa jos vika tapahtuu voimalaitoksen jälkeen tai juuri ennen on oikosulkuimpedanssi huomattavista pienempi pienvoimalan ja vian välillä kun sähköaseman ja vian. Tästä seuraa, että pienvoimala alkaa syöttää vikavirtaa vialle mikä pienentää sähköaseman kokemaa vikavirtaa ja sähköasemalla oleva oikosulkusuojaus ei toimi lainkaan tai toimii viiveellä jolloin vikavirta on voinut vahingoittaa verkon rakenteita. Tilanne on esitetty kuvassa 3.6. (Mäki 2004; Repo 2005)



Kuva 3.6. Johtolähdöllä sijaitseva pienvoimalaitos syöttää vikavirtaa vikapaikkaan pienentäen sähköaseman kokemaa vikavirtaa, jolloin sen suojaus ei havahdu.

Jotta edellä mainituista suojausongelmista päästäisiin eroon on panostettava pienvoimaloiden omaan suojaukseen ja sen nopeampaan toimintaan kuin verkon missä voimalaitos sijaitsee.

3.5 Käyttövarmuus

Sähköntuotanto yksikön sijaitseminen johtolähdöllä ei vaikuta pysyvien vikojen aiheuttamien kytkentätoimenpiteiden määrään, mutta voi kasvattaa kytkentätoimenpiteiden määrää lähdöllä ellei suojausongelmia ratkaista. Suojaus ongelmat on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.4.

Hajautettua sähköntuotantoa voidaan hyödyntää varavoiman muodossa, tilanteessa missä sähkönkuluttajalla on omaa tuotantoaan samassa liittymäpisteessä. Käyttökatkoksen sattussa voi sähkönkäyttäjä irtaantua omaksi saarekkeeksi, täten turvaten oman sähkönsaantinsa. Sama periaate myös pätee koko johtolähdölle jos tuotantoa on riittävästi.

Poikkeustilanteen aikana, jolloin sähköstä on pulaa voi hajautetusta tuotannosta olla suuri hyöty johtolähdölle. Poikkeustilanne voi olla huippukuormitus, syöttävän sähköaseman vikaantuminen tai runkojohdon vikaantuminen.

Huippukuormituksen aikana johtolähdöllä sijaitseva voimalaitos pienentää jakeluverkon kuormitusta koko siirtojärjestelmälle ja voi mahdollisesti estää kyseisen johtolähdön irtikytkennän. Tällainen järjestely todennäköisesti tehdään voimalaitoksen omistajan ja verkkoyhtiön välillä, mikäli voimalaitos kykenee tuottamaan tehoa tarvittaessa. Tällaista palvelua kutsutaan tekniseksi lisäpalveluksi. (Repo 2005)

Vikatapauksissa joissa joudutaan turvautumaan varasyöttöihin johtolähdöllä auttaa kyseisellä verkon alueella oleva pienvoimalaitos suuresti nostamalla jännitettä kyseisellä pätkällä riittävästi, jotta jännitteenalenema ei tule liian suureksi ja vähentäen varasyötön kuormitusta. (Repo 2005)

3.6 Verkon suunnittelu

Hajautetun sähköntuotannon vaikutus sähköverkkojen suunnitteluun on huomattava niin investointien, kuin teknisten reunaehtojen kannalta. Itse tekniset reunaehdot eivät muutu, mutta niiden tarkastelu muuttuu monimutkaisemmaksi, kuten myös investointi suunnitelmien tekeminen hajautetun tuotannon varalta. Investointi suunnittelussa suuren

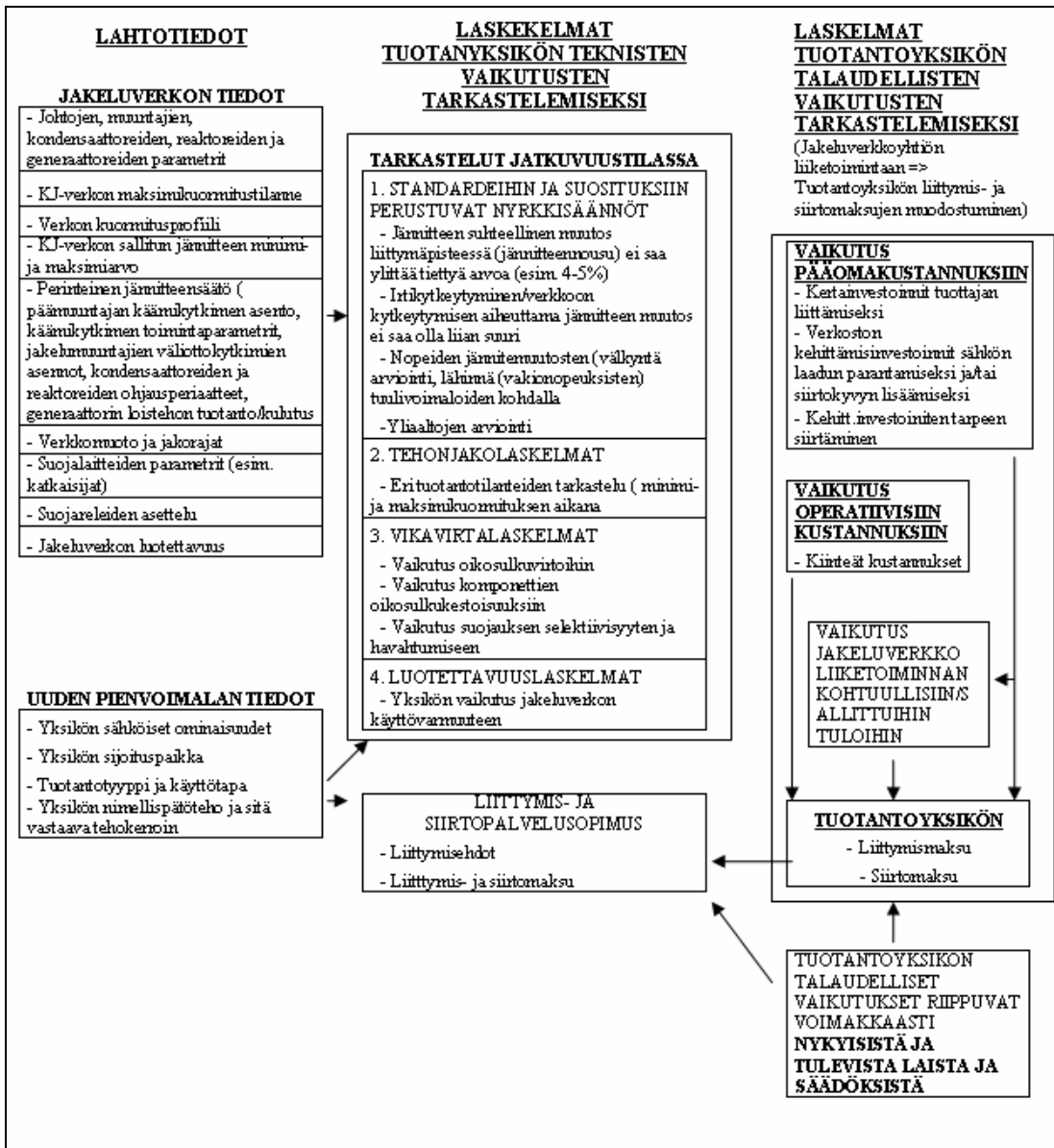
epävarmuuden luo tiedon puute tuotantoyksiköiden mahdollisista tyypeistä, sijainneista ja rakentamisajankohdista. (Repo 2003)

On huomioitava, että suurin osa sähköverkosta on jo olemassa niin hajautetun sähköntuotannon yleistymisen vaikuttaa pääsääntöisesti johtolähtöjen saneeraus suunnitteluun. Ennen voimalan liittämistä on selvitettävä sen vaikutukset verkkoon tehonjako- ja vikavirtalaskelmilla. Näiden laskelmien avulla nähdään tarvitaanko verkkoa vahvistaa tai mitä muutoksia suojaukseen täytyy tehdä. Tärkeää on, että riittävän tarkat tiedot tulevasta voimalaitoksesta on saatavilla. (Repo 2003)

Vaikka ”tulevien tuotantoyksiköiden ennustaminen on lähes mahdotonta” Repo(2003) ei olisi vaikeaa selvittää saneeraus suunnittelun yhteydessä, mitä mahdollisia paikallisia energianlähteitä jakeluveron alueella on käytettävissä. Tämä käytännössä tarkoittaisi sitä että verkkoyhtiö ottaa selvää alueen tuulioloista ja paikallisten vesiväylien tilanteesta. Tämän tiedon avulla verkkoyhtiöllä olisi jo kuva alueen energiapotentiaalista ja mahdollisista voimalaitosten sijainneista. Kerätyn tiedon perusteella voidaan jo harkita tietyn johtohaaran vahvistamista tapauksessa, että alueen tuuliolot ovat suotuisia tuulivoimaloille.

Johtolähdölle sijoitettava tuotantoyksikkö voidaan ottaa huomioon suunnittelussa, joko muokkaamalla asiakkaiden kuormituskäyriä tai lisäämällä lähdölle tuotantoyksikön laitoskoosta riippuen. Kuormitus käyrien muokkaaminen toimii parhaiten tilanteessa, missä tuotettua energiaa ei ole pääsääntöisesti tarkoitettu myytäväksi verkkoon, mutta pikemminkin oman sähkönsaannin turvaamiseksi kuluttajalla. Tuotantoyksikön lisääminen tulee kysymykseen, kun liitetään laitos suoraan 20 kV:n verkkoon ja laituskoko on jo suuri. Sama pätee jos asiakkaan verkossa oleva voimalan nimellisteho on reilusti yli asiakkaan oman kuormituksen. (Repo 2003)

Hajautetun tuotannon sijoittaminen jakeluverkkoon vaatii ennen kaikkiaan olemassa olevan verkon hyvää nykytilan tuntemusta. Kun tiedetään olemassa olevan verkon rajoitteet ja kapasiteetit niin vasta tämän jälkeen voidaan laskelmoida pienvoimalan vaikutusta verkkoon. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon teknisten vaikutuksien lisäksi millaisia taloudellisia vaikutuksia yksiköllä voi mahdollisesti olla. Tämä suunnittelu prosessi on esitelty kuvassa 3.7.



Kuva 3.7. Pienvoimalan liittämisen suunnitteluun tarvittavat osiot.

3.6.1 Suunnitteluperiaatteet

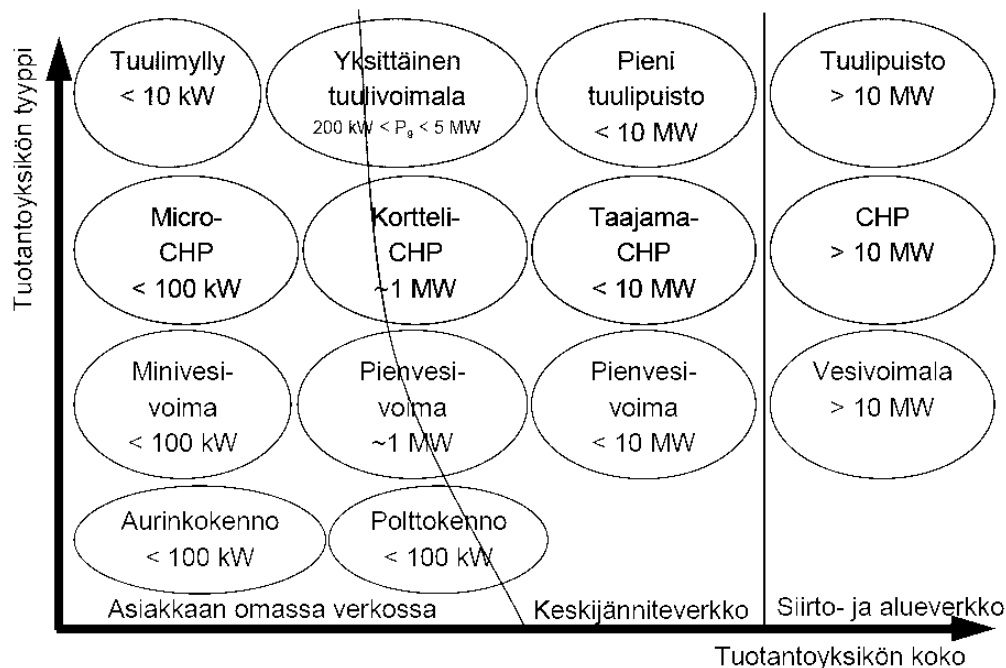
Jakeluverkot ovat suunniteltu alun perin toimimaan tilanteessa, missä sähköasemalta syötetään kulutusta ja vastaavasti teho kulkee myös sähköasemalta kulutukselle. Hajautetun tuotannon myötä lähtö muuttuu monesta pisteestä syötetyksi ja keskeisimmiksi ongelmiksi muodostuu jännitteen hallinta ja suojauksen toteuttaminen. (Janatuinen 2007)

Suunnittelutyötä tehdään nykyään käyttäen tietokantoihin perustuvilla laskentaohjelmistoilla, joihin on syötetty kulutuspisteiden kuormituskäyrät ja vuosienergiat. Näiden tietojen perusteella ohjelmisto tekee tehonjakolaskelmat ja muut laskelmat. Tilanne muuttuu kun lähdölle sijoitetaan pienvoimala, jonka tuotantoteho vaihtelee runsaasta. Tehon vaihtelu riippuu tuotantolaitoksen tyypistä ja sen käyttötarkoituksesta. Tuulivoimala on hyvä esimerkki yksiköstä, minkä tuotantoteho vaihtelee suuresti. Tämä on ongelma, koska tehonjako laskelmissa tuotantotehon tietäminen on tärkeää. Tämän takia on eri voimalaitos tyypeille laadittava tilastolliset tuotantotehot, mitä voidaan käyttää kuormituskäyrien kanssa tehonjakolaskelmissa. (Repo 2003)

3.6.2 Tuotannon liittämisen reunaehdot

Suunniteltaessa pienvoimalaitoksen liittämistä jakeluverkkoon, sen on täytettävä kappaleessa 3.3 mainitut tekniset ehdot, jotta voimalaitoksesta ei olisi vaaraa ihmisille tai itse verkolle. Juurikin aiemmin käsitellyt jännitteen nousu liittymäpisteessä, välkyntä ja nopeat jännitetason muutokset asettavat reunaehdoja kytkettävän voimalaitoksen tuotantotehon määrästä. Sähköverkon toimivuuden kannalta on tärkeää, että vikatilanteissa suojausautomaatiikka toimii nopeammin voimalaitoksessa kuin verkossa, muuten ilmenee kappaleessa 3.4 käsitellyjä ongelmia.

Hajautettuun sähköntuotantoon tarkoitettuja voimalaitoksia on tuotantoteholtaan monen kokoisia. Juurikin tuotantoteho sanelee mihin jänniteportaaseen yksikkö voidaan sijoittaa verkon kapasiteetin puitteissa. Eri tehoisten voimalaitosten jakautuminen jänniteportaisiin on esitelty kuvassa 3.8.



Kuva 3.8. Hajautetun tuotannon liittäminen eri jänniteportaisiin. (Repo 2003)

Tuotannon vaikutus jännitteen laatuun on yleensä sitä suurempi mitä suurempi on voimalan nimellisteho verrattuna verkon liittymispisteen oikosulkutehoon. Liittymispisteen oikosulkuteho kuvaa verkon kykyä sietää jännitteen ja virran vaihteluita. Oikosulkutehon suhde tuotantoyksikön nimellistehoon kuvaa verkon vahvuutta, joka on tyypillisesti vahvoilla verkoilla 20–25 ja heikoilla verkoilla alle 10. (Laaksonen 2004)

Pienvoimalaitoksen liittämiseksi verkkoon on tietyt ehdot täyttyvä, jotka koskevat:

- Suurinta sallittua jatkuvan tilan suhteellista jännitetason muutosta liittymispisteessä.
- Suurinta sallittua jännitemuutosta tuotantoyksikköä verkkoon kytkettäessä tai verkosta erotettaessa.
- Suurinta sallittua nopeiden jännitevaihteluiden määrää.
- Suurinta sallittua määrää tuotantoyksikön aiheuttamille yliaalloille.

Jos jokin yllä olevista ehdoista ylittyy, on harkittava laitokseen pienentämistä tai ongelman ratkaisemista muulla tavalla, kuten liittämistä korkeampaan jänniteportaaseen.

3.7 Verkon käyttö

Hajautettu sähköntuotanto avaa uusia mahdollisuuksia tuotannon tarjoamien teknisten lisäpalveluiden muodossa, mikä tehostaa verkon toimintaa. Kääntöpuolena tästä on verkon käyttäytymisen ennustaminen, mikä nykyisessä tilanteessa on suhteellisen helppoa. Jakeluverkossa yllätyksiä ei muodostu kuin vikatilanteissa ja tällä hetkellä niissä tilanteissa verkon toiminta on ennustettavissa. Pienvoimalan sijoittamisen jälkeen verkon toimintaan alkaa vaikuttaa suuresti voimalan tuotantotehon vaihtelu ja muu käyttäytyminen.

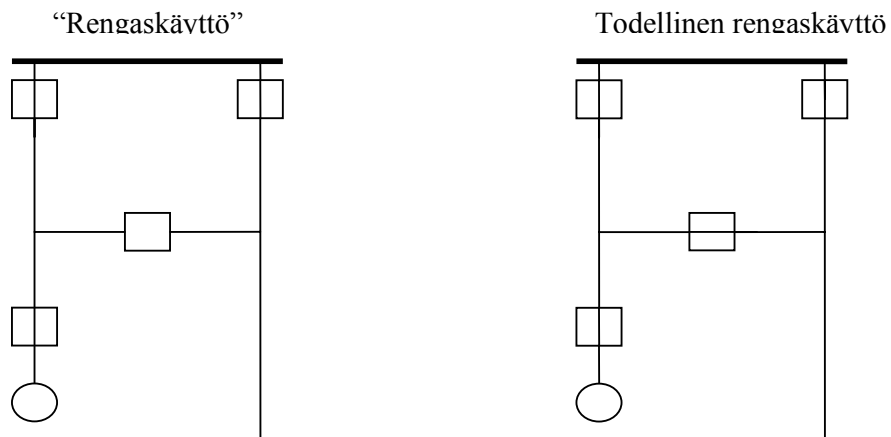
Teknisillä lisäpalveluilla tarkoitetaan pienvoimaloiden käyttämistä tehuippujen aikana mikäli mahdollista ja tilanteissa missä sähköaseman syöttö on vioittunut, eikä normaalia tehoa saada siirretyksi. Tästä aukeaa saarekekäytön mahdollisuus, mikä tulee todennäköisesti olemaan käytännössä harvinaista, mutta teoreettisesti mahdollista.

3.7.1 Rengaskäyttö

Kun säteittäisesti toimivaan jakeluverkkoon lisätään hajautettua tuotantoa, sen käyttö muuttuu periaatteellisesti rengaskäytöksi. Rengaskäytöllä tarkoitetaan tehon syöttämistä verkkoon useasta lähteestä, kun säteittäisessä teho tulee vain sähköasemalta.

Säteittäisesti toimiva verkko voidaan kuitenkin muuttaa todelliseksi renkaaksi yhdistämällä kaksi johtolähtöä kuvan 3.10 tapaisesti. Tämä todellinen rengas avaa uusia mahdollisuuksia hajautetun tuotannon ja verkon toimivuuden kannalta.

Todellisessa renkaassa käytetty verkko, missä on hajautettua tuotantoa, jakaa tehon tasaisemmin kuluttajille, häviöt pienentyvät ja jännitteen nousu ongelma laimenee voimalaitoksen kytkentä pisteessä kuten myös aiemmin koettu jännitteen lasku. Tämä vaihtoehto on erityisen hyvä ratkaisu heikoille verkoille, jotka säteittäisesti käytettynä eivät pystyisi käyttämään hajautettua tuotantoa ja kärsivät jännitteen liiallisesta alenemasta. (Densy 2007; Mäki 2004)



Kuva 3.10. Verkon käyttö ”renkaassa” ja verkon todellinen rengaskäyttö.

Suojauksen toiminta periaatteellisessa renkaassa toimii siten että voimalaitos kytkeytyy irti verkosta jolloin verkon oma suojaus voi toimia kuin säteittäisesti käytettynä. Todellisen renkaan tapauksessa tilanne on hieman monimutkaisempi koska vian sattuessa on renkaan muodostava yhteys katkaistava, jonka jälkeen yksittäiset lähdöt toimivat taas normaalilla tavalla vikatilanteessa. Tämä onnistuu silloin kuin rengasta käytetään vai yhdestä sähköasemasta. Ongelmaksi syntyy laitteiden terminen kestoisuus, koska vian tapahtuessa kestää pidempi aika sen irtikytkemiseen. (Densy 2007)

3.7.2 Saarekekäyttö

Saarekekäytön mahdollisuus jakeluverkoissa on teknisesti mahdollista hajautetun tuotannon lisäämisen myötä ja sen tuomat mahdollisuudet käyttövarmuuden kasvattamiseksi varmasti kiinnostavat verkkoyhtiöitä kasvavien keskeytyskustannusten hintojen myötä.

Ongelmana saarekekäytössä on verkon jännitteen ja taajuuden säätö. Tämä johtuu siitä että jakeluverkossa tehotasapainoa ei nykyisellään voida pitää pätö- ja loistehon suhteen, koska jakeluverkossa ei ole loistehontuottoa normaalisti. Nämä ongelmat luovat kovat vaatimukset hajautetun tuotannon automatiikalle ja lisäksi on suojaus ongelma. Saarekekäytössä tilanne on täysin erilainen kuin normaalisti verkossa ja tässäkin tilanteessa suojauksen on toimittava niin että vaaratilanteita ei syntyisi. Tämä on vaikeaa koska suojausasetusten on muututtava kun siirrytään saarekekäyttöön ja takaisin normaaliin. Näissä siirtymätilanteissa koko verkon automatiikka täytyy toimia oikein, jotta saareke

syntyisi ja on tärkeää ettei saarekkeeseen mentäisi vahingossa koska tuotanto ja kulutus harvoin vastaavat toisiaan. (Densy 2007; Mäki 2004)

Vaikka saarekekäytössä on vielä ongelmia ratkaistavana, pääosin jännitesäädön automatiikan ja suojauksen osalta, avaa se mahdollisuuden korkean käyttövarmuuden saavuttamiseksi jakeluverkoissa.

3.8 Taloudelliset vaikutukset

Yksi hajautetun tuotantojärjestelmän eduista on kantoverkkomaksujen pienentyminen jakeluverkossa, missä on hajautettua tuotantoa. Kanta- tai alueverkkoyhtiö mihin jakeluverkko on kiinnitetty, perii kuormitusmaksua kantaverkosta otosta ja annosta jakeluverkkoyhtiöltä. Muita maksuja on kulutusmaksu, mikä maksetaan kaikesta jakeluverkon kuluttamasta sähköstä. Kuormitusmaksujen suuruus pienenee, kun jakeluverkossa on omaa tuotantoa käytössä olettaen että yksikkö ei syötä takaisin kantaverkkoon. (Repo 2005)

Taulukosta 3.4 nähdään, että trendi maksuilla on nouseva paitsi kantaverkkoon annolla ja liittymäpiste maksulla. Tällainen kehitys tukee hajautetun sähköntuotannon lisäämistä jakeluverkkoihin, koska paikallisesti tuotetulla energialla korvataan kantaverkosta tarvittavan energian määrää.

Taulukko 3.4. Kantaverkkomaksut 2008-2011 (Fingrid)

| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | |
|---------------------------|------|------|------|------|------------------|
| Kulutusmaksu | | | | | |
| talviaika | 2,16 | 2,28 | 2,4 | 2,52 | €/MWh |
| muu aika | 1,08 | 1,14 | 1,2 | 1,26 | €/MWh |
| Kuormitusmaksu | | | | | |
| kantaverkosta otto | 0,66 | 0,68 | 0,7 | 0,72 | €/MWh |
| kantaverkkoon anto | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | €/MWh |
| Liityntäpistemaksu | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | €/piste/kuukausi |

Keskijänniteverkkoon sijoitettava sähköntuotantoyksikkö voi kuulua osana tässä jänniteportaassa sijaitsevaan teollisuuteen. Teollisuus on voinut investoida omaan

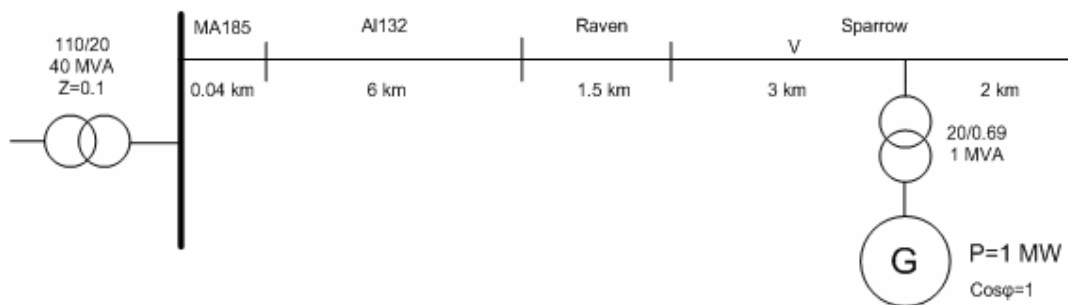
sähköntuotantoonsa korkean sähkönhinnan vuoksi tai turvatakseen oman sähkösaantinsa. Tämä ratkaisu pienentää verkkoyhtiön saamia tuloja siirtomaksuista, koska osa kulutuksesta tuotetaan itse kohteella pienentäen tehon tarvetta verkosta samalla periaatteella kuin jakeluverkon ja kantaverkon suhde.

Jakeluverkkoyhtiöille taloudellinen hyöty voi tulla kantaverkkomaksujen pienentymisen lisäksi keskeytyskustannuksissa. Käyttövarmuus paranee kappaleen 3.6 määritelmän mukaan eli koko johtolähdön irtikytkentä voidaan estää tietyissä tilanteissa näin vähentäen keskeytyskustannuksia.

Liittymismaksusta voi muodostua huomattavan suuri, tilanteessa, missä tuotantoyksikön koko on niin suuri, että jännitteen ja vikavirtojen kasvusta johtuvien ongelmien takia joudutaan keskijänniteverkkoa vahvistamaan. Toinen suuri kustannus tulee kysymykseen, jos tuotantoyksikköä ei voida sijoittaa olemassa olevan verkon läheisyyteen vaan joudutaan rakentamaan omaan linjaa yksikölle. Juuri näiden syiden takia liittymismaksu voi olla huomattavan suuri tietyissä tapauksissa, missä verkkoyhtiön on katettava kustannuksensa johtolähdön vahvistamisesta. (Repo 2003)

3.9 Esimerkki pienvoimalaitoksen liittämisestä jakeluverkkoon

Tässä pelkistetyssä esimerkissä tarkastellaan 1 MW tuulivoimalan liittämistä 20 kV johtolähdölle, jonka huipputeho on 2 MVA ja johtolähtö on rakenteeltaan taulukon 3.1 mukainen. Tuulivoimala sijoitetaan noin 10 km päähän sähköasemasta kuvan 3.9 mukaisesti.



Kuva 3.9. Johtolähdön periaatekuva pienvoimala kytkettynä.

Syöttävän verkon ja päämuuntajan impedanssi 20 kV verkosta katsottuna $Z = (0,7 + j4,0)\Omega$ ja johtolähdön tehokerroin on 0,8.

Taulukko 3.1. Johtolähdön rakenne.

| Johdinlaji | Pituus [m] | Resistanssi [Ω /km] | Reaktanssi [Ω /km] | I(max), 1s [kA] |
|------------|------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|
| MA185 | 40 | 0,172 | 0,115 | |
| AI132 | 6000 | 0,237 | 0,357 | 11,6 |
| Raven | 1500 | 0,580 | 0,389 | 5,1 |
| Sparrow | 5000 | 0,919 | 0,408 | 3,2 |

Tarkastelu aloitetaan verkon nykytilan määrittämisellä liittymispisteessä oikosulkutehon ja jännitteen aleneman osalta. Verkon jännite ja jännitteenalenema voimalaitoksen liittymäpisteessä on esitetty taulukossa 3.2 ja lasku esimerkit liitteessä 1.

Taulukko 3.2. Jännitteen alenema liittymispisteessä ja johtolähdön lopussa eri kuormituksilla.

| Teho [MW] | ΔU ,liit.piste [%] | U liit.piste[kV] | U j.lähdön lopussa [kV] |
|-----------|----------------------------|------------------|-------------------------|
| 0,5 | 1 | 20,3 | 20,25 (1,2 %) |
| 1 | 1,9 | 20,1 | 20,0 (2,5 %) |
| 2 | 3,8 | 19,7 | 19,5 (5 %) |

Verkon oikosulkuteho liittymäpisteessä on 40.9 MVA ja kaavaa (3.3) käyttäen saadaan

$$40,9 \text{ MVA} \geq 25 \text{ MVA},$$

tämä tarkoittaa, että voimalaitos voidaan liittää kyseiseen verkkoon, kytkätiliön osalta. Taulukosta 3.2 huomataan, että johtolähdön lopussa maksimikuormituksen aikana on 5 % jännitteen alenema. Tähän ongelmaan voimalaitos tulee auttamaan, mutta tärkeämpi seikka on jännitteen nousu minimi kuormituksen aikana jolloin tuulivoimalan tuotantoteho on maksimissaan. Tämä lasketaan kaavaa 3.1 käyttäen liittymäpisteelle ja normaalia jännitteen aleneman kaavaa johtolähdön lopulle. Tulokset on esitelty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3. Jännite liittymäpisteessä ja lopussa eri kuormituksilla voimalaitoksen tehon ollessa 1 MW

| P [MW] | U liittymäpisteessä [kV] | U j.lähdön lopussa [kV] |
|------------|--------------------------|-------------------------|
| 0,5 | 20,6 | 20,5 |
| 1 | 20,4 | 20,3 |
| 2 | 20,0 | 19,9 |

Taulukosta 3.3 nähdään, että liittymäpisteessä jännite nousee yli sähköaseman jännitteen kun tuotantoteho voimalaitoksella on maksimissaan ja kulutus lähellä minimissään. Tällainen tilanne voi tulla eteen tuulisena kesäyönä.

Jakelumuuntajien väliottokytkinten asettelu tulee yrittää asetella siten, että pienjänniteverkon jännite pysyisi annettujen rajojen sisällä riippumatta onko tuulivoimala verkossa vai ei.

Voimalaitoksen vaikutus vikavirtojen suuruuteen on myös tarkistettava. Kolmivaiheisen vastuksettoman oikosulun tapahtuessa pisteessä V, vikavirta ilman pienvoimalaa on 1,35 kA ja pienvoimalan kanssa 1,51 kA, laskenta liitteessä 2. Vikapaikassa kyseisen johtimen 1 sekunnin vikavirta kestoisuus on 3,2 kA taulukon 3.1 mukaan, mikä ei ylity. Vikavirta kasvaa 160 A verran, voimalaitoksen vaikutuksesta vikapisteessä V.

Koska tuulivoimalan huipunkäyttöaika on suomessa noin 2000 h, niin keskitehona voidaan pitää noin neljännes maksimi tehosta. Tämä tarkoittaa, että 1 MW voimala tuottaa noin 250 kW tehoa keskimäärin. Jolloin kyseisen laitoksen vaikutus johtolähdölle jää hyvin vähäiseksi jännitteen nousun ja vikavirtojen suhteen.

Tämän pintapuolisen tarkastelun perusteella kyseinen 1 MW:n tuuliturbiini voidaan kyseiseen verkkoon sijoittaa ilman verkon vahvistamista oikosulkukestoisuuden tai jännitteen nousun takia. Suojauksen toiminnan uudelleen asettelu on tehtävä.

4. HAJAUTETUN TUOTANNON SUOJAUS

Pienvoimalaitosten suojauksella on kaksi päätehtävää, jotka ovat jakeluverkon turvallinen käyttö ja voimalaitoksen oma turvallisuus vikatilanteiden aikana. Tämä asettaa suojauksen toiminnalle ehdot, mitkä tulisi täyttää aina.

4.1 Perussuojaus

Perussuojauksen tehtävä on taata voimalaitoksen turvallinen käyttö siten, että se ei aiheuta vaaraa ihmisille, verkolle tai voimalaitokselle itselleen.

Kuten aiemmin tässä työssä on todettu, tulee voimalaitoksen suojauksen toimia nopeasti vikatilanteen sattuessa ja mielellään nopeammin kuin verkon. Tällä varmistetaan, ettei voimalaitos syötä yksin lähtöä, mistä seuraa aiemmin kappaleessa 3.4 käsitellyjä ongelmia. Voimalaitos on tämän takia seurattava verkon jännitettä liittymäpisteessä. Kun jännitteen muutos nimellisestä ylittää asetetun arvon tulee laitos kytkeytyä irti verkosta näin estäen yksinsyötön vaaran. Sama periaate pätee myös verkon taajuuteen eli laitos kytkeytyy irti jos taajuus poikkeaa liikaa nimellisestä. (Mäki 2004; SENER 2001)

Pienvoimalaitoksen takaisinkytkentä sallitaan vasta kun liittymäpisteen kaikki vaiheet ovat jännitteellisiä ja taajuus kohdallaan. Juuri yksin syötön esto on suojauksen tärkein tavoite hajautetussa järjestelmässä verkon muun suojauksen kannalta.

4.1.1 Yli- ja alijännitesuojaus

Sähkökuluttajan kokema jännite tulee pystyä pitämään tiettyjen rajojen sisällä, joten pienvoimalalla on oltava yli- ja alijännitesuojaus.

Ylijännitesuojaus on tärkeää hitaasti säädettävien tahtigeneraattoreiden kannalta, koska jatkuva 15 % ylijännite voi vahingoittaa generaattoria. On myös tärkeää, että voimalaitoksen jännitteen säädön on toimittava hitaammin kuin johtolähtöä syöttävän päämuuntajan. Tämä sen takia, jos johtolähdöllä havaitaan jännitteen nousua, kerkeää päämuuntaja säätämään jännitettä ennen kuin pienvoimalaitos kytkeytyy irti. Näin välttyttäisiin turhilta irtikytketyksiltä. Ongelmana tämän tyyppisen suojausasettelun

kannalta on se että liittymäpisteessä jännite voi olla jopa korkeampi kuin sähköasemalla jollain päämuuntaja ei pysty reagoimaan jännitteen nousuun ja voimalaitoksen oma suojaus kytkee sen irti. (Mäki 2004)

Alijännitetilanne on myös ongelmallinen, koska pienvoimalaitoksen on kytkeydyttävä irti verkosta vikatilanteessa kuten kolmivaiheisen oikosulun aikana, jotta sähköaseman suojaus toimisi suunnitellusti. Kuitenkin voimalaitos ei saa kytkeytyä irti liian nopeastikaan. Jos alijännitesuojauksen aikaraja on liian lyhyt, kytkeytyy laitos irti normaalien jännitekuoppien takia. Alijännitesuoja toimii myös eräänlaisena vikavirta varasuojana, sillä jännitteen laskiessa se kytkee irti laitoksen. Tästä tulee ongelma jos laukaisuaika on liian suuri ja vikavirta on juuri niin vähäinen että varsinainen vikavirtasuojaus ei havahdu.

Ali- ja ylijännitesuojauksen asettelu on tärkeää pienvoimalaitoksen toimivuuden kannalta niin mekaanisesti kuin sähköteknesestikin. On löydettävä oikeat aikarajat, jotta välttyttäisiin turhilta irtikytkennöiltä ja laitoksen kestävyys olisi turvattu, kuten myös toiminta vikatilanteen sattuessa.

4.1.2 Yli- ja alitaajuussuojaus

Yli- ja alitaajuussuojaus tulee toimia samalla tapaa kuin jännitesuojaus eli voimalaitos erotetaan verkosta kun taajuus poikkeaa liikaa asetusarvosta.

Liiallisen alhainen taajuus rasittaa voimalaitosta termisesti ja mekaanisesti. On kuitenkin huomioitava, että taajuuden alitaajuussuojauksesta toimiva suojaus ei toimi liian nopeasti. Liian nopeasti toimiva alitaajuus suojaus voi aiheuttaa koko johtolähdön irtikytkennän voimalaitoksen irtikytkettyä. Tämä tapahtuu silloin kun kuormitus on johtolähdöllä todella suurta ja taajuus juuri pysyy tietyissä rajoissa voimalaitoksen kanssa, mutta kun voimalaitos tipahtaa pois niin taajuus tippuu tällöin entisestään jolloin sähköasema erottaa lähdön. Asetusarvo on asetettava suojaukseen siten että se sallii käytön tiettyyn rajaan saakka laitoksen oman kestävyuden rajoissa. (Mäki 2004)

Liian suuri taajuus ei ole ongelma pienvoimalaitoksille, koska näissä on pyörimisnopeuden rajoitin. Taajuuden nousun voi aiheuttaa suuren kuorman irti kytkeytyminen verkosta, jollin generaattorin pyörimisnopeus kasvaa mutta vain rajoittimeen saakka. Ylitaajuussuojaus toimii kuitenkin varasuojana.

4.1.3 Ylivirtasuojaus

Oikosulkusuojaus erottaa voimalaitoksen verkosta mahdollisimman nopeasti, ettei generaattori vaurioituisi ja vaikutukset verkkoon päin loppuisivat. Suojareleiden asettelut tulee tehdä niin että laukaisu toimii nopeammin kuin sähköaseman. Tämä siksi, että johtolähdön suojaus voi toimia säteittäisesti käytettynä, koska vian tapahtuessa pienvoimalaitos kytkeytyy ensin irti.

”Generaattorin ja verkon välinen oikosulkusuojaus perustuu nopeaan momenttilaukaisuun ja hitaampaan aikalaukaisuun. Momenttilaukaisu säädetään toimimaan vain voimalan lähellä tapahtuvissa vioissa. Momenttilaukaisun aika-asettelu säädetään niin pieneksi kuin mahdollista. Voimalan käynnistysvirta voi kuitenkin asettaa rajoituksia asetteluille. Käynnistysvirran rajoittamisen avulla voidaan laukaisu säätää mahdollisimman nopeaksi.”(Mäki 2004 s.26)

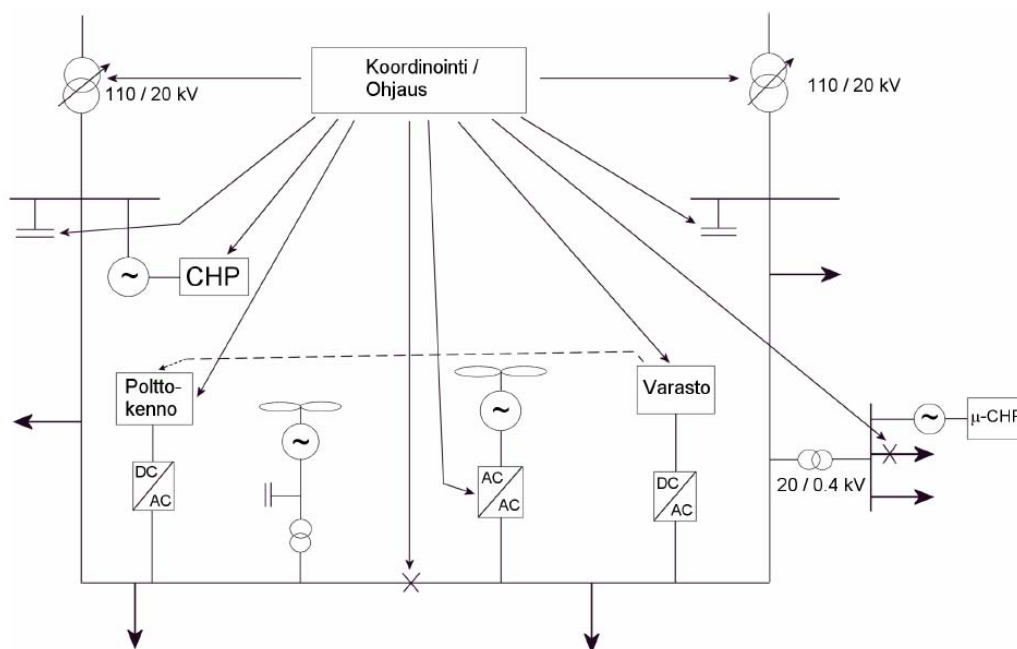
5. TULEVAISUUDEN VERKOSTOVAIKUTUKSET

Kasvavan energiantarpeen tyydyttämiseksi ja energia monipuolisuuden kasvattamiseksi tulee hajautettu sähköntuotanto todennäköisesti lisääntymään lähivuosina. Kehitys itse pienvoimalaitostekniikassa ja verkostoautomaatioissa tulevat mahdollistamaan hajautetun järjestelmän todelliset edut. Trendi kehityksessä on ollut kohti aktiivisesti toimivaa jakeluverkkoa, perinteisen passiivisen sijasta. Lähivuosina voi olla nähtävissä pienten kiinteistökohtaisten CHP yksiköiden yleistyminen, mutta nämä eivät ole tarkoitettu syöttämään tuotettua sähköä verkkoon. Näillä pien-CHP yksiköillä tuotetaan sähköä ja lämpö vai omaan käyttöä, eikä siten vaikuta verkkoon muulla tavoin kuin pienentyvänä kuormituksena.

5.1 Aktiivinen jakeluverkko

Aktiivisella jakeluverkolla tarkoitetaan verkkoa, joka keskitetysti huolehtii verkon jännitteen laadusta, sähköntuotannosta, kuormista ja suojauksen toiminnasta. Jakeluverkkoa kontrolloiva yksikkö saa reaaliaikaista mittaustietoa pienvoimaloilta ja kulutukselta. Tämän tiedon avulla yksikkö säätää pienvoimaloiden tuotantoa ja optimoi verkon käyttöä. Tämä aktiivinen malli mahdollistaa tehokkaan todellisen rengas käytön nopeuttamalla suojauksen toimivuutta. Keskus yksikkö voi myös ohjata kuormia tarvittaessa taatakseen verkon toimivuuden.

Aktiivinen jakeluverkko voi sisältää monenlaista tuotantoa ja hyödyntää sitä sopivalla ajankohdalla. Hyvä esimerkki eri energialähteiden hyödyntämisestä on pienen kuormituksen ajalle sattuva tuulivoiman tuotantotehon maksimi. Keskus yksikkö ymmärtää tilanteen ja ohjaa tulevan tehon kulutukselle ja loput energiavarastoon. Tilanteen muuttuessa, kun kuormitus kasvaa, mutta tuulesta saatava teho on lähelle minimiään tai jopa nolla voidaan aiemmin täydennettyä energia varastoa hyödyntää. Tällä tavalla ulkopuolisen energian tarve jakeluverkkoon saadaan aina optimoitua, kun jakeluverkko toimiin lähes itsenäisenä. Aktiivinen verkko myös säätelee jakeluverkossa tuotettua loistehoa voimalaitosten ja kulutuksen tarpeen mukaan ja tätä kautta siirrettävän loistehon osuus siirtoverkosta pienenee. Aktiivisella loistehon säädöllä jännitteen säätö onnistuu myös hyvin. Kuvassa 5.1 on hahmotelma aktiivisesta jakeluverkosta, jossa on keskitetty ohjaus. (Densy 2007; Repo 2003; Laaksonen 2004)



Kuva 5.1. Aktiivinen sähköjaketeljärjestelmä. (Repo 2003)

Kuvasta 5.1 voidaan nähdä, että ohjausyksikkö säätelee jännitettä päämuuntajien muuntosuhdetta muuttamalla, jakeluverkossa loistehon tuotantoa ja kulusta ohjaamalla. Kuvasta on nähtävissä myös, että ohjausyksikkö ohjaa rengaskäyttöä verkossa. Vian sattuessa se koordinoi suojausten toiminnan ja katkaisee rankaan kahdeksi johtolähdöksi irrottaa tarvittavan lähdön voimat ja suorittaa suojausten kuin säteittäisesti käytetyssä verkossa.

5.2 Energiavaraston vaikutus verkkoon

Tuloaan on tekemässä vahvasti tuulivoimalla tuotetun sähköenergian muuttaminen vedyksi ja tämän käyttäminen polttokennossa. Tämän tyyppisellä ratkaisulla on selvät hyötynsä, koska tuulivoimalla tuotettua sähköä ei aina kyetä täysin hyödyntämään, joten sillä voidaan valmistaa vetyä vedestä elektrolyysin avulla. Tuotetun vedyn varastointi on ollut ongelma aiemmin, mutta nyt uudentyypisten metallihybridin säiliöiden avulla voidaan vety varastoida tehokkaasti. Tämä varastoitu vety voidaan muuttaa takaisin sähköksi polttokennoilla, joiden kehitys menee eteenpäin nopeaa tahtia ja polttokennoja on jo 10 MW:n tehoon saakka. Tällä tavalla aiemmin käsitelty aktiivinen verkko voi hyvin pitkälle kontrolloida omaa energiantarvettaan. (Densy 2007)

Kuten ilmi on käynyt tuulivoimala jakeluverkossa tehonvaihtelunsa takia aiheuttaa erilaisia ongelmia niin jännitteen kuin suojauksen tiimoilta. Tutkimisen arvoinen kohde on varmasti kytkeä tuulivoimala suoraan vedyn tuottamiseen, mitä käytettäisiin polttokennossa. Tämän tyyppisellä ratkaisulla ohitettaisiin tehon vaihtelun ongelma muodostaen energia bufferin tuulivoiman ja verkon välille. Tällainen yhdistelmä mahdollistaisi tehon tasaisen tuottamisen. Hyötysuhde tietenkin tipahtaa melkoisesti, mutta hyöty tulisi tasaisesta tuotannosta. Esimerkiksi 4 MW:n huipputehooon kykenevä tuulivoimala aina toimiessaan tuottaisi vetyä ja tämä poltettaisiin 1 MW:n polttokennossa läpi vuoden. Tässä on syytä pohtia, että kumpi on parempi ratkaisu pienempi helposti hallittava tuotto vai täysin sattumanvaraisesti vaihteleva.

Verkon näkökulmasta tasainen ja ennakoitava tuotanto on huomattavasti helpompi vaihtoehto sähköntuotantoyksiköksi. Verkon käyttäytymisestä tulisi helpommin ennakoitavaa ja yhdistettynä aktiiviseen järjestelmään huomattavasti tehokkaampaa. Molemmat teknologiat tekevät vasta tuloaan ja ovat kalliita toteuttaa, mutta niiden täyttä potentiaali vielä tutkitaan.

6. YHTEENVETO

Hajautettu sähköntuotanto on tehokos ja pääsääntöisesti ympäristöystävällisempi energia ratkaisu kasvavaan energiantarpeeseemme. Jakamalla sähkön tuotannon kuormaan pienempiin osiin, jopa kiinteistökohtaisiin ratkaisuihin. Pääsemme parempaan kokonaishyötysuhteeseen ja monipuolisempaan energia kokonaisuuteen.

Jakeluverkko ei ole alun perin suunniteltu rengaskäyttöä varten vaan käytettäväksi säteittäisenä. Koska jakeluverkossa ei ole aktiivista jännitteen säätöä kuten siirtoverkossa niin tästä seuraavat ongelmat liian korkeista jännitteistä pienjännite ja keskijännite puolella. Pienvoimaloiden yksikkökoosta riippuvat nopeat jännitteen vaihtelut laitoksen kytkeytyessä verkkoon voi aiheuttaa suurenkin jännitekuopan, jos laitoksen nimellisteho on suuri verrattuna johtolähdön oikosulkutehoon.

Suojauksen kannalta renkaassa käytetty jakeluverkko on kallis toteuttaa, joten on päädytty ratkaisuun missä, pienvoimalaitos kytkeytyy ensin irti jolloin johtolähdön suojaus voi toimia normaalisti säteittäisessä käytössä. Tämä asettaa tiukat vaatimukset pienvoimaloiden suojauksella, jotta niistä ei olisi suurta haittaa verkolle.

Vikavirrat kasvavat tiettyssä määrin koko jakeluverkossa ja edellyttää eri komponenttien vikavirta kestoisuuksien tarkistamista hyvissä ajoin ennen tuotantoyksikön kytkemistä verkkoon. Vikavirta kestoisuuksien ylittyessä on harkittava voimalaitoksen tehon rajoittamista tai verkon vahvistamista. Tässä tilanteessa on tehtävä kannattavuuslaskelmat vaihtoehtojen välillä.

Pienvoimalan sijoittamisesta johtolähdölle on myös monenlaista hyötyä, kuten jännitteen aleneman pienentyminen ja mahdollisuudet käyttää yksiöitä varavoima tarkoituksessa. Varavoimakäyttö on sovittava yksikön omistajan kanssa ja edellyttää, että kyseinen tuotantoyksikkö voi todellakin tuottaa tarvittavan tehon tarvittaessa. Tällaista ehtoa ei tuulivoimala voi täyttää.

Taloudellisesta näkökulmasta, mitä enemmän tehoa tuotetaan jakeluverkossa, sitä vähemmän joutuu jakeluverkkoyhtiö maksamaan kantaverkko maksuja. Suunnittelun

kannalta on lähes mahdotonta ennustaa, koska ja minne tuotanto yksiköitä tulee, mutta perehtymällä jakelu alueeseen voidaan saada jonkin näköinen käsitys mahdollisuuksista.

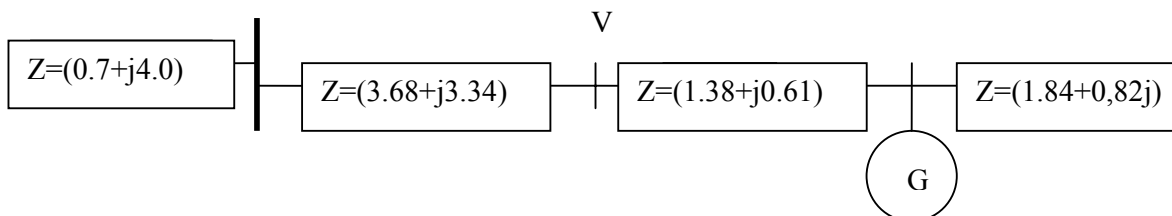
Hajautetun sähköntuotannon täyttä hyötyä ei saada, ennen kuin verkko automaatio kehittyy tasolle jolloin jakeluverkko toimii aktiivisesti, valvoen tuotantoa ja kulutusta.

LÄHDELUETTELO

- (Densy 2007) Distributed Energy Systems 2003-2007.
ISBN 978-952-457-388-7
- (Elovaara 1988) Jarmo Elovaara ja Yrjö Laiho. Sähkölaitostekniikan perusteet.
Helsinki 2005. ISBN 951-672-285-7
- (Janatuinen 2007) Janatuinen, Hanno. Diplomityö, Pienvoimalan mallinnus ja
jakeluverkkovaikutusten tarkastelu. 2007. LTY.
- (Jenkins 2000) Jenkins, N. & Allan, R. & Crossley, P. & Kirschen, D. & Strbac, G.
2000. Embedded Generation. The Institution of Electrical Engineers.
London. 273 s.
- (Laaksonen 2004) Laaksonen, Hannu. Diplomityö, Hajautetun tuotannon
tilastollisuuden ja keskijänniteverkon aktiivisen jännitteensäädön
huomioiminen verkostolaskennassa. Tampere 2004.
- (Lakervi 2007) Erkki Lakervi. Sähkön jakelu ja markkinat luentokalvot. TTY 2007.
- (Lakervi 2008) Erkki Lakervi ja Jarmo Partanen. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki
2008. ISBN 978-951-672-357-3
- (Mäki 2003) Kari Mäki, Pertti Järventausta ja Sami Repo. Tuulivoimaan
perustuvan hajautetun sähköntuotannon vaikutus
keskijänniteverkon suojaukseen. Tampere: Tampereen
teknillinen yliopisto, 2003, 93.s. ISBN 952-15-1048-X
- (Mäki 2004) Kari Mäki. Keskijänniteverkkoon liitetyn hajautetun tuotannon
vaikutus johtolähtöjen oikosulkusuojaukseen Tampere: Tampereen
teknillinen yliopisto, 2004, 65 s. ISSN 1459-529X

- (Mörsky 1994) Mörsky J., Mörsky J., Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka, Otatieto, Helsinki 1994, 300 s.
- (Nigel 2002) Nigel C. Scott, David J. Atkinson ja James E. Morrell. Use of load control to regulate voltage on distribution networks with embedded generation. IEEE Transactions on power systems, Vol. 17, NO. 2, MAY 2002
- (Repo 2003) Sami Repo, Hannu Laaksonen, Antti Mäkinen ja Pertti Järventausta Hajautetun tuotannon huomioiminen sähkönjakeluverkon suunnittelussa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2003, 42s. Raportti/Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkövoimatekniikka; 2003. ISBN 952-15-1047-1
- (Repo 2005) Sami Repo, Hannu Laaksonen, Kari Mäki, Antti Mäkinen, Pertti Järventausta Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset keskijänniteverkossa Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkövoimatekniikan laitos. Tutkimusraportti 2005:3. ISBN 952-15-1382-9
- (SFS 2000) SFS-EN 50160. 2000. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. 28 s.
- (SENER 2001) Sähköenergialiitto ry SENER, Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon, Julkaisusarja 3/01, Helsinki 2001, 25 s.
- (Siltanen 1999) Siltanen, L. 1999. Sähköntuotantolaitosten liittäminen jakeluverkkoon. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen Korkeakoulu. 105 s.

Liite I Laskut kappaleen 3.9 esimerkkiin



Kuva 1. Impedanssit: syöttäväverkko + päämuuntaja, ennen vikapaikkaa, johtimien impedanssi vikapaikan tuuliturbiinin liittymäpisteen välillä, tuuliturbiinin liittymäpisteestä johtolähdön loppuun.

Lähtötiedot:

Johtolähtö:

$$P(\max) = 2000 \text{ kW}$$

$$P(\min) = 500 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$U = 20,5 \text{ kV (Sähköasemalla)}$$

Generaattori:

$$S = 1000 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 1$$

$$U_n = 690 \text{ V}$$

$$X_d = 10 \%$$

Generaattorin muuntaja:

$$S = 1 \text{ MVA}$$

$$U_n = 20 \text{ kV}$$

$$Z_k = 5,5 \%$$

Jännitteet:

Jännitteenalenema liittymäpisteessä 1 MW kuormituksen aikana käyttäen johtolähdölle tehokerrointa 0.8:

$$\frac{P}{U^2} \cdot (R + X \tan \varphi) \cdot 100 \% = \Delta U$$

$$\frac{1 \text{ MW}}{(20.5 \text{ kV})^2} \cdot (5 + 3.95 j \cdot 0.75) \cdot 100 \% \approx 1.9 \%$$

Jännitteen alenema johtolähdön lopussa 1 MW kuormalla:

$$\frac{1 \text{ MW}}{(20.5 \text{ kV})^2} \cdot (6.84 + 4.78 j \cdot 0.75) \cdot 100 \% \approx 2,48 \%$$

Oikosulkuteho generaattorin liittymäpisteessä:

$$I_{oik} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{oik}} = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot (5,7 + 7,95 j)} = 1,18 \text{ kA} \angle -54^\circ$$

$$S_{oik} = I_{oik} \cdot U \cdot \sqrt{3} = 40,9 \text{ MVA}$$

Jännitteen nousu liittymäpisteessä ja johtolähdön lopussa:

Jännitteen nousu generaattorin liittymäpisteessä minimikuormituksen ja maksimituotannon aikana

$$\Delta U \approx \frac{R_v \cdot P_{Ng} + X_v \cdot Q_{Ng}}{U_a} = \frac{5,7 \cdot 1 \text{ MW}}{20,3 \text{ kV}} \approx 0,281 \text{ kV}$$

Jännitteen nousu johtolähdön lopussa lasketaan käyttäen jännitteen alenema kaavaa mutta nyt lähtöpisteenä on generaattorin liittymäpiste.

$$\frac{1 \text{ MW}}{(20.58 \text{ kV})^2} \cdot (1,84 + 0,82 j \cdot 0.75) \cdot 100 \% \approx 0,6 \%,$$

eli johtolähdön lopussa jännite on 20,46 kV.

Tuuliturbiinin kytkeytymisestä aiheutuva jännitteen muutos:

Jännitteen muutos lasketaan kaavan 3.3 mukaan kytkeytymishetkelle.

$$\Delta U = i_{\text{suhte}} \cdot \frac{S_n}{S_{\text{oik}}} \cdot U_V = 1 \cdot \frac{1 \text{ MVA}}{40,9 \text{ MVA}} \cdot \sqrt{3} \cdot 20,3 \text{ kV} \approx 860 \text{ V}$$

Eli noin 2,5 %, joka on huomattavasti alle suositeltavan 4 % muutoksen.

Vikavirrat tuulivoimalan kanssa ja ilman:

Vikavirta pisteessä V ilman turbiinia:

$$I_f = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot (4,38 + 7,34j)} = 1,35 \text{ kA} \angle -59^\circ$$

Tuulivoimalan kanssa:

Impedanssit redusoituna 20 kV portaaseen:

$$X_g = 0,1 \cdot \frac{(0,690 \text{ kV})^2}{1 \text{ MVA}} \cdot \left(\frac{20 \text{ kV}}{0,69 \text{ kV}} \right)^2 = 40 \Omega$$

$$X_m = 0,055 \cdot \frac{(20 \text{ kV})^2}{1 \text{ MVA}} = 22 \Omega$$

Vikaimpedanssi:

$$Z_f = \frac{(4,38 + 7,34j) \cdot (1,38 + 62,64j)}{(4,38 + 7,34j) + (1,38 + 62,64j)} = (3,5 + 6,78j)$$

Vikavirta kun vikapaikan jännite 20 kV:

$$I_k = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot (3,5 + 6,78j)} = 1,5 \text{ kA} \angle -62^\circ$$