



LAPPEENRANNAN
TEKNILLINEN YLIOPISTO

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

080450000 Sähkömarkkinoiden seminaari

KANDIDAATINTYÖ

7.6.2007

Sanni Siltala

0239427

Säte 5

Tasasähköjakelun käyttömahdollisuudet

PL 20, 53851 LAPPEENRANTA, p. 05 62111, fax. 05 621 6799

<http://www.ee.lut.fi/fi/lab/sahkomarkkina>

SISÄLLYSLUETTELO

Käytettävät merkinnät ja lyhenteet	3
1 Johdanto	5
2 Sähkönjakelun kehitys Suomessa	6
3 Tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien vertailu ja mitoitus.....	7
3.1 Siirtojohtojen ominaisuudet	7
3.1.1 Siirtojohtojen resistanssi	7
3.1.2 Siirtojohtojen terminen kuormitettavuus	8
3.1.3 Tehohäviöt	10
3.3 Tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt.....	12
3.4 Jännitteenalenema	12
3.5 Nollausehto	13
4 Nykyinen pienjänniteverkko.....	15
5 Tasasähköjärjestelmät	17
5.1 Unipolaari- ja bipolaariyhteys.....	18
5.2 Siirtojohtot	19
5.2.1 Johtimien kytkeminen.....	20
5.3 Siirtokyky.....	22
5.3.1 Siirtoteho ja siirtoetäisyys.....	22
6 Tehoelektronikan toteutustavat.....	24
6.1 Suuntaajat.....	24
6.1.1 Tasasuuntaaja.....	25
6.1.2 Vaihtosuuntaaja.....	26
6.1.3 Suuntaajien häviöt.....	27
6.2 Suodatuslaitteet.....	28
7 Tasasähköjärjestelmän teknistaloudelliset käyttömahdollisuudet	29
7.1 Tehoelektronisten komponenttien hintakehitys	29
7.2 Tehoelektronisten suuntaajien hinnat	30
7.3 Hajautettu tuotanto.....	31
7.4 Pienjännitetasasähköjakelun teknistaloudellinen tarkastelu	32
7.4.1 Esimerkkiverkko	33
8 Yhteenveto	39
Lähteet.....	41

Käytettävät merkinnät ja lyhenteet

Lyhenteet

AC	vaihtovirta
AMKA	alumiinijohtiminen riippukierrekaapeli
DC	tasavirta
PEN	johdin, jossa yhdistetty maa- ja suojamaa
PWM	pulssinleveysmodulaatio
SFS	Suomen standardoimisliitto
VAC	vaihtojännite
VDC	tasajännite

Muuttujat

A	poikkipinta
I	virta
K	kustannus
L	johtimen pituus
n	lukumäärä
S	näennäisteho
r	ominaisresistanssi
P	pätöteho
U	jännite
Z	muuntajan impedanssi
x	induktanssi
η	hyötysuhde
φ	vaihekulma

Alaindeksit

%	prosentuaalinen
0	keskiarvo
1	ensimmäinen

2	toinen
ac	vaihtosähköjärjestelmä
auraus	auraus
bi	bipolaarijärjestelmä
dc	tasasähköjärjestelmä
h	häviö
johdin	johdin
johto	johto
m	maakaapeli
meno	menojohdin
n	lukumäärä
pa	poikkipinta
paluu	paluujohdin
tot	kokonais
Uh	jännitteenalenemaraja
uni	unipolaarijärjestelmä
v	vaihejohdin

1 Johdanto

Pienjännitedirektiivi määrittelee pienjännitteen maksimiarvoksi vaihtojännitteellä 1000 VAC ja tasasähköllä 1500 VDC. Pienjännitettä on tähän mennessä hyödynnetty sähköjakelussa vain vaihtojännitealueella. Tasajännitettä käytetään sähköjakelussa nykyään vain suurjännitteillä, johtuen tasasähköjärjestelmien suurista kustannuksista. Elektroniikkalaitteiden kehittyminen ja hinnan lasku sekä kone- ja metalliteollisuuden hintojen nousu ovat mahdollistaneet ajatuksen tasasähkön käytöstä pienjännitteillä.

Sähkönsiirrossa ja – jakelussa johtojen tehtävänä on siirtää tuotantopisteissä tuotettu teho kuluttajan käytettäväksi ylittämättä teknisiä reunaehtoja. Nykyiset pienjännitekaapelit on suunniteltu käytettäväksi kolmivaiheisella vaihtovirralla, mutta niitä voidaan käyttää myös tasasähkönsiirrossa.

Tasasähköjakeluun siirtymisen edellytyksenä sähköjakelussa on tasajännitteen käyttäminen vain tehonsiirtojännitteenä ainakin aluksi. Tasasähkö tulee vaihtosuunnata ja muuntaa sopivaksi jännitteeksi viimeistään asiakkaan liitännässä, koska nykyiset sähkölaitteet on mahdollista kytkeä vain vaihtosähköliitintään.

Tämän työn tarkoitus on kartoittaa pienjänniteverkon tasasähköjakelun teknisiä ja taloudellisia mahdollisuuksia ja haasteita.

2 Sähkönjakelun kehitys Suomessa

Suomea aloitettiin sähköistämään 1900-luvun vaihteessa, jolloin kolmijohtiminen (bipolaarinen) tasasähköjärjestelmä oli vallitseva pienjännitejakelujärjestelmä. Siinä suuret kuormitukset kytkettiin vaihejohtimien väliin ja pienet kuormitukset pyrittiin jakamaan tasan järjestelmän jännitetasojen kesken. (Paavola 1975)

Vaihtosähköön siirryttiin 1910- ja 1920- luvuilla, kun tarvittiin entistä parempaa tehonsiirtokykyä maaseutujen sähköistämistä varten. Siirtyminen tasasähköjärjestelmästä vaihtosähköjärjestelmään johtui paremman tehonsiirron lisäksi mm. vaihtosähköjärjestelmään tarvittavien kaapeleiden edullisimmista investointikustannuksista sekä kolmivaiheisen epätahtimoottorin tehokkuudesta. (Paavola 1975)

Sähkönjakelussa on viime vuosikymmeninä käytetty ainoastaan vaihtosähköverkkoja, koska tehoelektronisten laitteiden korkea hinta ja tekniset ominaisuudet ovat johtaneet tasasähkön käyttöön vain suurjännitteellä. (Salonen 2006)

Yhteiskunta on muuttunut yhä riippuvaisemmaksi sähköstä ja odotukset sähkönlaadulle ovat yhä korkeammat. Sähkön laatuvaatimukset ja tehoelektroniikan hinnan lasku sekä tehoelektroniikan kehittyminen ovat herättäneet uudelleen ajatuksen tasasähkön käytöstä sähkönjakelussa.

3 Tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien vertailu ja mitoitus

Tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien tekniset ominaisuudet voidaan määrittellä tässä kappaleessa esitettyjen perusyhtälöiden avulla. Näitä yhtälöitä voidaan hyödyntää vertailtaessa ja mitoittaessa eri jakelujärjestelmiä.

3.1 Siirtojohtojen ominaisuudet

Jakelujärjestelmien vertailun tekemiseksi tulee tuntea molempien järjestelmien siirtojohtojen ominaisuudet. Kolmivaiheiselle järjestelmälle voidaan käyttää eri lähteissä kaapeleille esitettyjä yleisiä arvoja, mutta tasasähköjärjestelmässä siirtojohdon ominaisuudet tulee määrittää käytettävän kaapelityypin perusteella. Jos tasasähköjärjestelmän kaapelina käytetään kolmivaiheista vaihtosähkökaapelia, on siirtojohdon resistanssi ja terminen kuormitettavuus määritettävä ennen kuin järjestelmiä vertaillaan keskenään. (Salonen 2006)

3.1.1 Siirtojohdon resistanssi

Kun käytetään olemassa olevia kaapeleita, siirtojohdon resistanssit riippuvat käytettävästä kaapelista sekä johtimien kytkennästä. Siirtojohdon johtimien kytkentä riippuu pienjännitejohdon johtimien sekä tasasähköjärjestelmän jännitetasojen lukumäärästä. (Salonen 2006)

Unipolaarijärjestelmän siirtojohdon resistanssia laskettaessa on otettava huomioon sekä meno- että paluujohtimien resistanssit, koska paluujohtin on järjestelmän ominaisuuksista johtuen virrallinen. Ominaisresistanssin yhtälöksi saadaan

$$r_{uni} = r_{meno} + r_{paluu} = \frac{1}{\sum_{i=n} \frac{1}{r_i}} + \frac{1}{\sum_{i=n} \frac{1}{r_i}} \quad (1)$$

missä r_{uni} = unipolaarijärjestelmän siirtojohdon ominaisresistanssi
 r_{meno} = johdon menojohtimen ominaisresistanssi

r_{paluu} = johdon paluujohtimen ominaisresistanssi
 n = rinnan kytkettävien johtimien lukumäärä. (Salonen 2006)

Bipolaarijärjestelmän siirtojohto on kolmijohtiminen, joista yksi on nollajohdin. Kaksi muuta johdinta ovat järjestelmän positiivisen ja negatiivisen jännitetason vaihejohtimia. Kun käytetään kolmijohtimista kaapelia, johtimien ominaisresistanssit ovat käytännössä samat kuin vaihejohtimien ominaisresistanssit. Bipolaarijärjestelmän ominaisresistanssit voidaan laskea yhtälöllä

$$r_{bi} = \frac{1}{\sum_{i=n} \frac{1}{r_i}} \quad (2)$$

missä r_{bi} on bipolaarijärjestelmän siirtojohdon vaihejohtimen ominaisresistanssi. (Salonen 2006)

3.1.2 Siirtojohdon terminen kuormitettavuus

Johdon terminen kuormitettavuus riippuu käytettävästä tasasähköjärjestelmästä sekä siirtojohdossa käytettävistä pienjännitejohdoista. Jos siirtojohto sisältää rinnankytkettyjä johtimia, on terminen kuormitettavuus mitoitettava jokaiselle kytkennälle erikseen. Käytettäessä tasasähköjärjestelmää, riippuu siirtojohdon terminen kuormitettavuus käytettävän johdon rinnankytkettyjen johtimien yhteisestä kuormitettavuudesta. Termistä kuormitettavuutta määritettäessä on puolestaan otettava huomioon mahdollisten rinnankytkettyjen johtimien välinen virranjako. (Salonen 2006)

Kirchoffin jännitelain avulla voidaan määrittää virranjako

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (3)$$

jossa U_1 = johtimen 1 yli oleva jännite
 U_2 = johtimen 2 yli oleva jännite
 U_n = on johdon n yli oleva jännite. (Salonen 2006)

Esimerkiksi kahdelle rinnankytketylle johtimelle voidaan Kirchoffin lakia soveltaen laskea virranjako, jolloin rinnankytkettyjen johtimien virroille saadaan riippuvuus

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \\ r_1 l_1 I_1 &= r_2 l_2 I_2 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{r_2}{r_1} I_2 \end{aligned} \quad (4)$$

jossa r_1 = johtimen 1 ominaisresistanssi
 r_2 = johtimen 2 ominaisresistanssi
 l_1 = johtimen 1 pituus
 l_2 = johtimen 2 pituus
 I_1 = johtimen 1 termien kestoisuus
 I_2 = johtimen 2 termien kestoisuus. (Salonen 2006)

Tällöin kahden rinnankytketyn johtimen termien kestoisuus on molempien johtimien kuormitettavuuksien summa

$$I_{tot} = I_1 + I_2 = \frac{r_2}{r_1} I_2 + I_2 = \left(\frac{r_2}{r_1} + 1 \right) I_2 \quad (5)$$

missä I_{tot} on rinnankytkettyjen johtimien termien kestoisuus. (Salonen 2006)

Soveltaessa yhtälöä 5, on otettava huomioon epäyhtälö

$$r_2 \leq r_1 \quad (6)$$

koska siirtojohtimien termien kestoisuus ei voi ylittää johtimien termien kestoisuussummaa. (Salonen 2006)

Jos yhtälön 5 siirtojohtimien nollajohtimien on resistanssiltaan yhtä suuri kuin vaihejohtimien, supistuu yhtälö muotoon (Salonen 2006)

$$I_{tot} = \left(\frac{r_2}{r_1} + 1 \right) I_2 = 2I_2. \quad (7)$$

Mitoitettaessa tasa- ja vaihtosähköverkkoa on otettava huomioon johtimien terminen kestoisuus.

Vaihtosähköjärjestelmän kuormitusvirta saadaan yhtälöstä

$$I_{ac} = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \quad (8)$$

missä I_{ac} = vaihtosähköjärjestelmän kuormitusvirta
 P = järjestelmän teho
 U = järjestelmän jännite
 φ = vaihtosähköjärjestelmän vaihekulma.

Bipolaarijärjestelmän kuormitusvirta saadaan yhtälöstä

$$I_{bi} = \frac{P}{2 \cdot U} \quad (9)$$

missä I_{bi} = bipolaarijärjestelmän virta.

Unipolaarijärjestelmän kuormitusvirta saadaan yhtälöstä

$$I_{uni} = \frac{P}{U} \quad (10)$$

missä I_{uni} = unipolaarijärjestelmän virta.

Verkon kuormitusvirta tulee olla pienempi kuin siirtojohtojen terminen kuormitettavuus, joten

$$I_{ac/bi/uni} < I_{tot} \quad (11)$$

missä $I_{ac/bi/uni}$ = järjestelmän kuormitusvirta.

3.1.3 Tehohäviöt

Tasasähköjärjestelmän siirtohäviöt riippuvat siirtojohtojen kytkennästä. Seuraavissa yhtälöissä esitetään tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien häviötehojen suhteet, kun siirtoteho ja siirtomatka ovat molemmissa järjestelmissä samat. (Salonen 2006)

Unipolaarijärjestelmän virroille voidaan määrittää riippuvuussuhde

$$P_{uni} = P_{ac}$$

$$U_{uni} I_{uni} = \sqrt{3} U_{ac} I_{ac,v} \cos \varphi \Rightarrow I_{uni} = \frac{\sqrt{3} U_{ac} \cos \varphi}{U_{uni}} I_{ac,v} \quad (12)$$

Järjestelmien häviötehojen suhde voidaan esittää yhtälöllä

$$\frac{P_{h,uni}}{P_{h,ac}} = \frac{r_{uni} l_{uni} I_{uni}^2}{3r_{ac} l_{ac} I_{ac}^2} = \frac{r_{uni} I_{uni}^2}{3r_{ac} I_{ac}^2}. \quad (13)$$

Kun sijoitetaan virtojen riippuvuussuhde yhtälöön, saadaan häviöteholle riippuvuussuhde

$$\frac{P_{h,uni}}{P_{h,av}} = \frac{r_{uni} \left(\frac{\sqrt{3} U_{ac} \cos \varphi}{U_{uni}} I_{ac,v} \right)^2}{3r_{ac} I_{ac}^2} = \frac{r_{uni} U_{ac}^2 \cos^2 \varphi}{r_{ac} U_{uni}^2} = \frac{r_{uni}}{r_{ac}} \left(\frac{U_{ac}}{U_{uni}} \right)^2 \cos^2 \varphi \quad (14)$$

Jos oletetaan vaihtosähköverkon häviöiden tapahtuvan vain resistansseissa ja vaihesiirto oletetaan olemattomaksi, voidaan yhtälö supistaa muotoon

$$\frac{P_{h,uni}}{P_{h,ac}} = \frac{r_{uni}}{r_{ac}} \left(\frac{U_{ac}}{U_{uni}} \right)^2 \quad (15)$$

Tämän yhtälön avulla voidaan helposti vertailla vaihtosähköjärjestelmän ja unipolaarijärjestelmän häviötehojen eroja.

Bipolaarijärjestelmän tapauksessa virtojen riippuvuussuhteeksi saadaan

$$P_{bi} = P_{ac} \quad (16)$$

$$2U_{bi} I_{bi} = \sqrt{3} U_{ac} I_{ac,v} \cos \varphi \Rightarrow I_{bi} = \frac{\sqrt{3} U_{ac} \cos \varphi}{2U_{bi}} I_{ac,v}$$

Järjestelmien häviötehojen suhde voidaan esittää yhtälöllä

$$\frac{P_{h,bi}}{P_{h,ac}} = \frac{2r_{bi} l_{bi} I_{bi}^2}{3r_{ac} l_{ac} I_{ac}^2} = \frac{2r_{bi} I_{bi}^2}{3r_{ac} I_{ac}^2}. \quad (17)$$

Kun sijoitetaan virtojen riippuvuussuhde yhtälöön, saadaan häviöteholle riippuvuussuhde

$$\frac{P_{h,bi}}{P_{h,av}} = \frac{2r_{bi} \left(\frac{\sqrt{3} U_{ac} \cos \varphi}{2U_{bi}} I_{ac,v} \right)^2}{3r_{ac} I_{ac}^2} = \frac{2r_{bi} U_{ac}^2 \cos^2 \varphi}{4r_{ac} U_{bi}^2} = \frac{1}{2} \frac{r_{bi}}{r_{ac}} \left(\frac{U_{ac}}{U_{bi}} \right)^2 \cos^2 \varphi \quad (18)$$

Jos oletetaan vaihtosähköverkon häviöiden tapahtuvan vain resistansseissa ja vaihesiirto oletetaan olemattomaksi, voidaan yhtälö 18 supistaa seuraavaan muotoon

$$\frac{P_{h,bi}}{P_{h,ac}} = \frac{1}{2} \frac{r_{bi}}{r_{ac}} \left(\frac{U_{ac}}{U_{bi}} \right)^2 \quad (19)$$

Tämän yhtälön avulla voidaan helposti vertailla vaihtosähköjärjestelmän ja bipolaarijärjestelmän häviötehojen eroja.

3.3 Tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt

Tyhjäkäynti- ja kuormitushäviökomponenttien laskeminen muuntajille sekä suuntaajille on esitetty yhtälöissä 20 ja 21. Koska tasasuuntaaja muodostuu kahdesta tasasuuntaajayksiköstä, tulee tasasuuntaajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt laskea kaksinkertaisena. Vaihtosuuntaaja sijoitetaan jokaisen asiakkaan sähköliitintään, jolloin mitoitettaessa tasasähköjakeluverkkoa, yhtälöillä 20 ja 21 saadut yhden vaihtosuuntaajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt kerrotaan vaihtosuuntaajien lukumäärällä. (Salonen 2006)

$$S_n \cdot (1 - \eta) \cdot 0,04, \quad (20)$$

$$\left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \cdot S_n \cdot (1 - \eta) \cdot 0,96, \quad (21)$$

missä η on hyötysuhde
 S_n on laitteen nimellisteho
 S on kuorman näennäisteho

3.4 Jännitteenalenema

Tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien mitoituksessa on otettava huomioon jännitteenalenema, jotta käyttäjien sähkönlaatu pysyy sähkön laatustandardin EN 50160 rajoissa. Laatustandardin ja alan itsensä määräämien ohjeistuksien mukaan asiakkaan ja sähköyhtiön verkon liittymiskohdassa vaihejännitteen ei tulisi vaihdella verkon normaalitilanteessa enempää kuin 230 V +6/-10 %, eli suurin vaihteluväli on 207-244 V. (Partanen 2006)

Perinteiselle 20/0,4 kV vaihtosähköjärjestelmälle jännitteenalenema saadaan määriteltyä seuraavilla yhtälöllä

$$U_h = r \cdot l \cdot I \quad (22)$$

$$U_{hm} = \sqrt{3ZI} \quad (23)$$

$$U_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \quad (24)$$

missä U_h = jännitteenalenema
 r = ominaisresistanssi
 l = johdon pituus
 I = kuormitusvirta
 U_{hm} = muuntajan jännitteenalenema
 Z = muuntajan impedanssi
 $U_{h\%}$ = jännitteenalenema prosentteina
 U_1 = jännitetason arvo

Bipolaarijärjestelmälle jännitteenalenema määritetään ainoastaan yhdelle jännitetasolle yhtälöiden 25 ja 26 mukaisesti.

$$U_h = r \cdot l \cdot I \quad (25)$$

$$U_{h\%} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100\% \quad (26)$$

Unipolaarijärjestelmälle voidaan määrittää jännitteenalenema yhtälöiden 27 ja 28 mukaisesti. Unipolaarijärjestelmässä on kaksi jännitteellistä johdinta.

$$U_h = 2 \cdot r \cdot l \cdot I \quad (27)$$

$$U_{h\%} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100\% \quad (28)$$

3.5 Nollausehto

Mitoitettaessa vaihtosähköverkkoa on otettava huomioon myös nollausehto. Pienjänniteverkoissa syötön nopean poiskytkennän on toimittava tietyssä ajassa, pienimmän yksivaiheisen oikosulkuvirran vaikutuksesta. Toisin sanoen virran tulee olla niin suuri, että sulake palaa riittävän nopeasti, ja toisaalta sulakkeen nimellisvirta ei saa olla liian suuri. Tasasähköllä nollausehtoa ei tarvitse ottaa huomioon. Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua yhtälöllä (SA 2:92)

$$I_{k1v} = \frac{3 \cdot U_v}{\sqrt{(2R_m + R_{m0} + 3l(r_j + r_0))^2 + (2X_m + X_{m0} + l(2x_j + x_{j0} + 3x_0))^2}} \quad (29)$$

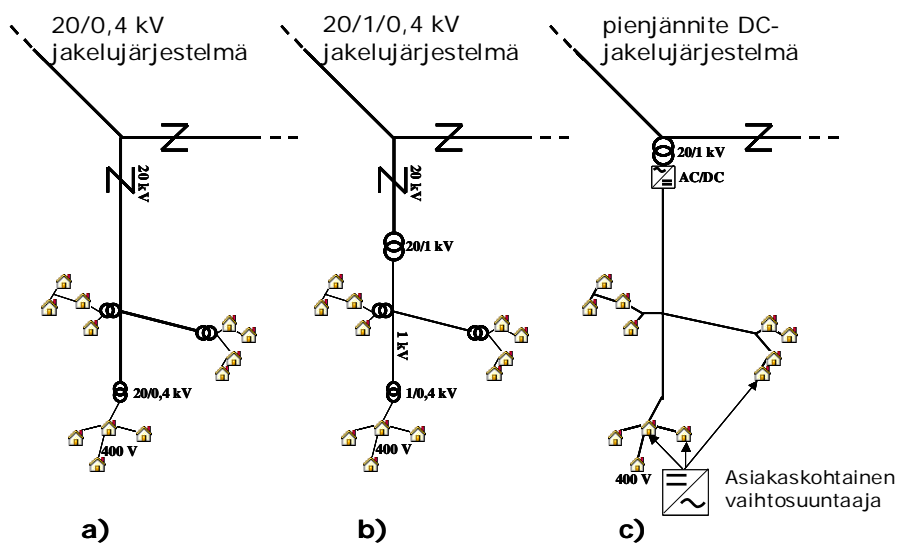
missä U_v = vaihejännite r_j = vaihejohtimen resistanssi
 R_m = muuntajan oikosulkuresistanssi x_j = vaihejohtimen reaktanssi

X_m	= muuntajan oikosulkureaktanssi	x_{j0}	= vaihejohtimen nollareaktanssi
R_{m0}	= muuntajan nolaresistanssi	r_{j0}	= nolajohtimen resistanssi
X_{m0}	= muuntajan nolareaktanssi	x_0	= nolajohtimen reaktanssi
l	= johdon pituus		

Tasa- ja vaihtosähköverkkoja mitoitettaessa on otettava lisäksi huomioon investoinneista ja ylläpidosta aiheutuvat kustannukset. Tasasähköjärjestelmän teknistaloudellinen laskenta on esitetty kappaleessa 7.

4 Nykyinen pienjänniteverkko

Sähkönjakeluverkossa on perinteisesti käytetty 20 kV keskijännitettä ja 0,4 kV pienjännitettä. EU:n pienjännitedirektiivi on mahdollistanut pienjännitejakeluverkon jännitetason nostamisen 1 kV, jolloin voidaan käyttää kilovoltin jännitetasoa perinteisten jännitetasojen välissä. Tämä lyhentää keskeytyksille herkkää keskijänniteverkkoa, jolloin se parantaa sähkönjakelun luotettavuutta etenkin sähkökäyttäjän näkökulmasta. Kilovoltin jänniteporras parantaa myös sähkön laatua, tuottaa kustannussäästöä ja pienentää sähköjohdoista aiheutuvia maisemahaittoja. Kilovoltin pienjännitejakelu on toteutettu muuttamalla jännite keskijänniteverkosta kilovolttiin ja sähkön loppukäyttäjälle 1 kV:sta 400 V. Taloudellinen käyttöalue 1000 V johdolle muodostuu yleensä alle 100 kW tehoille ja johtopituuksille muutamasta 100 m:stä noin 10 km:iin. Kuvassa 1 on esitetty perinteisen 20/0,4 kV ja kolmijänniteportaisen 20/1/0,4 kV AC-jakeluverkon sekä DC-jakelua hyödyntävän verkon rakenteelliset periaatteet. (Lohjala 2005; LTY 2005a)



Kuva 1. Yksinkertainen malli a) 20/0,4 kVAC jakeluverkosta ja b) 20/1/0,4 kVAC jakeluverkosta ja c) pienjännite DC-jakelua hyödyntävästä jakeluverkosta. (Kaipia 2006)

Sähkönjakelujärjestelmien jännitetaso määritetään kahden vaiheen välisen jännitteen tehollisarvona. Sähkön kuluttajan sähkölaitteiden käyttöjännitteenä käytetään

vaihejännitettä, joka on pienempi kuin pääjännite ja esiintyy maan ja vaiheen välissä. Tällöin saadaan perinteinen 400 V järjestelmän vaihejännitteeksi 230 V. Suurin osa käyttäjien sähkölaitteista on 1-vaiheisia eli käyttävät 230 V vaihejännitettä, mutta useilla asiakkailta on myös jokin 3-vaiheinen kuorma, kuten sähköliesi tai sauna. (Salonen 2006)

5 Tasasähköjärjestelmät

Tasasähköjärjestelmässä 20 kV keskijännite muunnetaan ensi kilovolttiin, jonka jälkeen tasajännite tuotetaan suuntaamalla vaihtojännite tehoelektronisella tasasuuntaajalla. Tasasähköjärjestelmässä tasajännite on muutettava vaihtojännitteeksi tehoelektronisen vaihtosuuntaajan avulla viimeistään asiakkaan liitännässä.

Tasasähkö tulee vaihtosuunnata ja muuntaa asiakkaalle sopivaksi jännitteeksi viimeistään sähkönkäyttäjän liitännässä, koska nykyään käytettävät sähkölaitteet on mahdollista kytkeä vain vaihtosähköliitännään. Tasajännitteen käyttäminen jakeluverkossa edellyttää tasa- ja vaihtosuuntaajan lisäämistä tasajänniteportaan alku- ja loppupäähän. Tällöin komponenttien määrä lisääntyy jakeluverkossa, vaikka vaihtosuuntaajilla korvattaisiin 1 kV – ratkaisussa tarvittavat pienjännitemuuntajat kokonaan. (Salonen 2006)

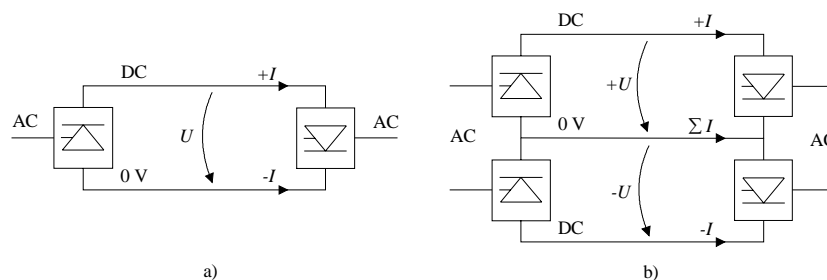
Sähkönkäyttäjän jännitteenalenema ongelmat vähenevät, kun vaihtosuuntaajalla tuotetaan suoraan 0,4 kV jännitetaso. Tällöin tasasähköjärjestelmän siirtojohdoilla voidaan sallia suurempi jännitteenalenema kuin vaihtosähköverkoissa, koska vaihtosuuntaaja voi tuottaa kuluttajan tarvitseman vaihtojännitteen nimellisjännitettä huomattavasti pienemmästä tasajännitteestä. Jos tasasähköyhteyden suojaus toteutetaan johdonsuojauskatkaisijan avulla kuten 1 kV vaihtojärjestelmä, muodostaa jokainen tasasähköyhteys tällöin oman itsenäisen suojausalueensa, joka parantaa jakelujärjestelmän käyttövarmuutta kokonaisuudessaan. (Salonen 2006)

Tasajännitettä on käytetty julkisessa sähköjakelussa ainoastaan sähköistymisen alkuaikoina. Täten tasasähköjärjestelmät nykyisessä muodossaan ovat käytännössä täysin uutta teknologiaa sähköjakelun alueella. Uuden teknologian käyttöön ottaminen tuottaa aina riskinsä, joiden huomioon ottaminen ja hallitseminen ovat suuressa roolissa käyttöönoton alkuvaiheessa. (Salonen 2006)

5.1 Unipolaari- ja bipolaariyhteys

Tasasähköjakelujärjestelmä voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, unipolaari- ja bipolaariyhteydellä. Unipolaari- ja bipolaariyhteyksien erot muodostuvat käytettävien jännitetasojen määrästä, suuntaajien määrästä sekä järjestelmien teknisistä ominaisuuksista. Unipolaariyhteydessä on käytössä vain yksi jännitetaso, jonka kautta siirretään tehoa. Unipolaarijärjestelmä vaatii siirtojohdon, joka koostuu kaksijohtimisesta johdosta, joista toinen johdin toimii virran meno- ja toinen paluujohtimena. Unipolaariyhteys on esitetty kuvassa 2 a). (Mörsky 1994)

Bipolaariyhteydessä käytetään kahta jännitetasoa, jotka ovat samansuuruiset, mutta vastakkaismerkkiset verrattuna yhteiseen nollajohtimeen. Bipolaariyhteys tarvitsee kolmejohtimisen siirtojohdon, jossa on nollajohdin sekä kaksi vaihejohtinta. Bipolaariyhteys on esitetty kuvassa 2 b). (Mörsky 1994; Paavola 1975)



Kuva 2. Kuvassa on esitetty a) unipolaari- ja b) bipolaariyhteys. (Kaipia 2006)

Pienjännitedirektiivin mukaan tasasähköverkon pienjännite saa olla maksimissaan 1500 V. Tasasähköllä jännitteen huippuarvo on sama kuin tehollisarvo, jolloin syöttö- ja ulostulonapojen välinen potentiaaliero pienjännitteellä saa olla maksimissaan 1500 VDC. Näin ollen unipolaarijärjestelmän käyttöjännite voi olla 1500 VDC ja bipolaarijärjestelmän +/- 750 VDC, jos 3-johtiminen pienjännitekaapeli tuodaan käyttäjälle asti. Bipolaarijärjestelmässä asiakkaan liitettä voidaan tehdä myös 2-johtimisena kytkemällä johtimet joko eri napoihin tai navan ja nolla välille. (Salonen 2006)

5.2 Siirtojohdot

Sähkönsiirrossa ja – jakelussa johtojen tehtävä on siirtää tuotantopisteessä tuotettu teho kuluttajan käytettäväksi teknisiä reunaehtoja ylittämättä. Nykyiset pienjännitekaapelit on suunniteltu käytettäväksi kolmivaiheisella vaihtovirralla, mutta niitä on myös mahdollista käyttää tasasähkönsiirrossa. Tasasähköjärjestelmän asettamat vaatimukset johtimille riippuvat käytettävästä tasasähköjärjestelmästä. Yleensä pienjännitekaapelit ovat nelijohtimisia, jolloin kaapelin käyttämisen edellytyksenä on johtimien kytkeminen rinnan tai jättämällä osa kaapelin johtimista käyttämättä. Unipolaarijärjestelmässä tarvitaan kaksijohtiminen siirtojohto ja bipolaarijärjestelmässä kolmijohtiminen. Uni- ja bipolaarijärjestelmissä siirtojohtojen kytkennöillä on suuri vaikutus johdon kokonaisresistanssiin ja termiseen kuormitettavuuteen, joilla on suuri vaikutus sähkönsiirron ominaisuuksiin. (Salonen 2006)

Johdon induktanssi ei vaikuta tasajännitteellä jatkuvuustilassa, jolloin johdon jännitehäviö on pienempi. Tasajännitteellä johtimessa ei esiinny virranahtoa, jolloin häviöresistanssi on pienempi. Tästä johtuen myös tehohäviöt ja jännitteenalenema ovat myös pienemmät. Tasasähköjärjestelmä ei rakenteensa vuoksi siirrä oikosulkuvirtoja, jolloin saavutetaan vikatapauksissa etua vaihtosähköjärjestelmään verrattuna. Bipolaariyhteydellä on vikatapauksissa mahdollista käyttää tervettä napaa koko tehollaan ja vikaantunutta napaa tehottomana tai vain osalla tehosta, riippuen vikakohdasta. (Mörsky 1994; Paavola 1975)

SFS standardeissa 4879, 4880, 5800 ja 5546 on määritelty pienjännitekaapeleiden suurimmat sallitut nimellisjännitteet tasasähkökäytöissä. Standardien mukaan johtimissa vaikuttavat nimellisjännitteet saavat olla korkeintaan 1,5 kV eri vaihejohtimien välillä ja 0,9 kV maa- ja vaihejohtimien välillä. AMKA-riippujohtimia koskeva SFS 2200 standardi ei sisällä ainakaan vielä määrittelyä kaapelin käyttämisestä tasasähköjärjestelmissä. Nykyisten 0,6/1 kV pienjännitekaapeleiden standardointi rajoittaa pienjännitealueen käyttämistä kokonaan hyödyksi tasajännitealueella 75-1500 VDC. (SFS 2200; SFS 4879; SFS 4880; SFS 5800; SFS 5546)

Standardoinnin puitteissa tasasähkön soveltaminen nykyisillä pienjännitejohdoilla on mahdollista ainoastaan maakaapeleilla ja niilläkin vain mahdollista rajoitetulla pienjännitealueella. Rakenteellisesti AMKA-riippukierrejohtojen käytölle tasajännitekäytössä ei ole periaatteellista estettä, mutta tasajännitekestoisuus on vaikea arvioida ilman käytännön mittauksia. AMKA-riippukierrejohtojen käyttö tasajännitteellä edellyttää, että tasajännitekäyttöä koskevat määräykset merkitään standardiin ja nollajohdinta koskevat määräykset tarkennetaan. (Salonen 2006)

5.2.1 Johtimien kytkeminen

Johtojen tekniset ominaisuudet on tiedettävä, jotta voidaan käyttää tasajännitettä. Olemassa olevia kaapeleita käytettäessä siirtojohtojen ominaisuudet riippuvat suurimmaksi osaksi vaihe- ja nollajohtimen kytkentätavasta. Kytkentätapa vaikuttaa siirtojohdon resistanssiin, jonka suuruus vaikuttaa johdonhäviöihin sekä maksimipituuteen ja – tehoon. Kahden tai useamman johtimen rinnankytkennässä johtimien kytkentä vaikuttaa myös johdon termiseen kestoisuuteen. (Salonen 2006)

Kytettäessä kaapelin johtimia rinnan on otettava huomioon virran jakautuminen johtimien kesken. Kytkentä tulee tehdä niin, että virta joko jakautuu tasan johtimien kesken tai muussa tapauksessa varmistuttava siitä, ettei kuormitus virta ylitä johtimien maksimikuormitusta. Kun rinnankytketyt johtimet ovat samaa materiaalia, samanpituisia, niitä ei ole haaroitettu ja niillä on samat poikkipinnat, voidaan olettaa virran jakautuvan tasan niiden kesken. Pieni poikkipintaisia johtimia tai kaapeleita ei suositella kytkettävän rinnan enempää kuin kaksi. Rinnankytkettyjen johtimien tulee olla monijohdin kaapeleiden johtimia, kierrettyjen yksijohdinkaapeleiden johtimia tai eristettyjä johtimia. (SFS 6000; Salonen 2006)

Unipolaarisessa tasasähköjärjestelmässä kuormitusvirta kulkee aina nollajohdinta pitkin ja bipolaarisessa silloin, kun vaiheiden välillä esiintyy epäsymmetriaa. Jos bipolaarijärjestelmässä kuormat kytketään maan ja vaiheen välille, ei kuormitusvirta

käytännössä koskaan jakaannu täysin tasan eri jännitetasojen kesken, jolloin nollajohdinta koskevat vaatimukset tulee täytyä aina tasasähköjärjestelmissä. Virran harmonisten yliaaltojen osuus nollajohtimessa ei saa olla suurempi kuin 10 %, jos nolla johtimena käytetään vaihejohdinta poikkipinnaltaan pienempää johdinta. Muulloin nollajohtimen poikkipinnan tulee olla vähintään vaihejohtimen suuruinen. (SFS 6000; Salonen 2006)

Unipolaarijärjestelmää käytettäessä johtimien kytkentä voidaan tehdä usealla eri tavalla, jotka on esitetty taulukossa 1. Taulukon 1 kytkentätavat 1, 2 ja 3 tulevat kyseeseen, kun tasasähköjärjestelmän siirtojohtona käytetään nelijohtimista sähköjohtoa ja kaikkia halutaan käyttää hyödyksi. Kytkentätavat 4 ja 5 ovat poikkeustapauksia, kun halutaan käyttää siirtojohtoina yksivaiheisia kaapelia tai kaapelia, jossa on vain kaksi johdinta. Viisijohtimisella pienjännitekaapelilla käytetään kytkentätapaa 6. (Salonen 2006)

Taulukko 1. Unipolaarijärjestelmän johtimien kytkentätavat, kun käytetään samoja johtoja kuin vaihtosähköjärjestelmässä. (Salonen 2006)

Kytkentätapa	Menojohdin (+)	Paluujohdin (-)
1	Yksi vaihejohdin	Kaksi vaihejohdinta ja nollajohdin rinnan
2	Kaksi vaihejohdinta rinnan	Vaihejohdin sekä nollajohdin rinnan
3	Kolme vaihejohdinta rinnan	Nollajohdin
4	Yksi vaihejohdin	Yksi vaihejohdin
5	Yksi vaihejohdin	Nollajohdin
6	Kaksi vaihejohdinta rinnan	Kaksi vaihejohdinta rinnan

Bipolaarijärjestelmässä käytettävät johdot ovat käytännössä kolmi- tai viisijohtimisia johtoja. Kummassakin johtotapauksessa nollajohdin kytketään aina nolla tasoon, kun taas vaihejohtimet kytketään taulukon 2 mukaisesti riippuen johtimien lukumäärästä. Nelijohtimista johdolla käytetään taulukon 2 kytkentätapaa 1 ja kytkentätapaa 2 käytetään viisijohtimisella johdolla. Bipolaarijärjestelmä on käytännössä helpompi toteuttaa kytkentätavalla 1, mutta kytkentätapaa 2 käytetään 4^{1/2}- ja 5-johtimisilla pienjännitekaapeleilla, joissa on vaihe johtimien lisäksi yksi konsentrinen johdin. (Salonen 2006)

Taulukko 2. Bipolaarijärjestelmän johtimien kytkentätavat, kun käytetään samoja johtoja kuin vaihtosähköjärjestelmässä. (Salonen 2006)

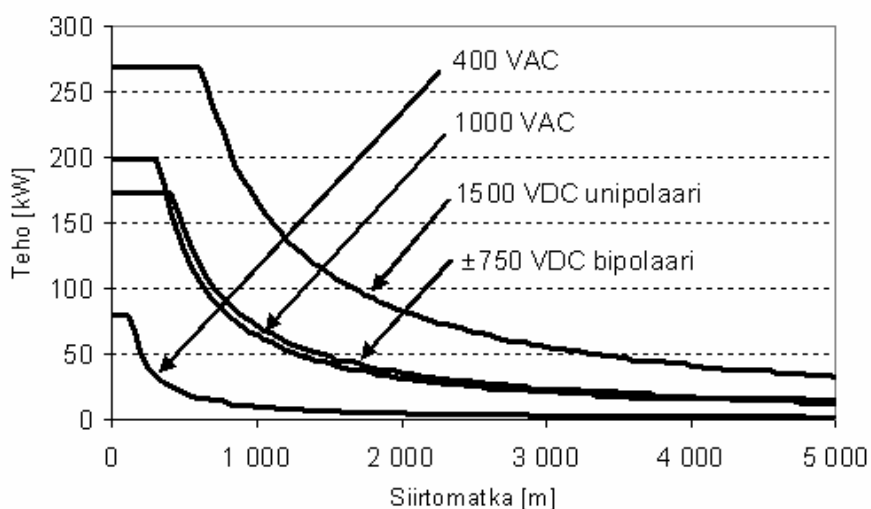
Kytchentätapa	Positiivinen potentiaali verrattuna nollapotentiaaliin ($+U_{dc}$)	Negatiivinen potentiaali verrattuna nollapotentiaaliin ($-U_{dc}$)
1	Yksivaihejohdin	Yksivaihejohdin
2	Kaksi vaihejohdinta rinnan	Kaksi vaihejohdinta rinnan

5.3 Siirtokyky

Tasasähköllä voidaan käyttää pienjännitteellä suurempaa syöttöjännitettä kuin vaihtosähköllä. Tämän lisäksi huomioiden muut edellä mainitut erot AC- ja DC-järjestelmien välillä, voidaan tasajännitejärjestelmällä siirtää suurempi teho kuin vaihtojännitteellä. Tämä mahdollistaa mm. keskijännitehaarajohtojen korvaamisen soveltuvalla tehoalueella pienjännitetasasähköyhteydellä. Tällöin tasasähköjärjestelmän avulla voidaan saavuttaa myös maisemallista hyötyä ilmajohtoja käytettäessä, koska pienjännitejohto ei tarvitse ympärilleen leveää johtokatua. (Salonen 2006)

5.3.1 Siirtoteho ja siirtoetäisyys

Tasasähköjärjestelmällä tehoa voidaan siirtää suurempi määrä tai vastaavasti pidempi matka kuin vaihtosähköjärjestelmällä. Tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien maksimitehon siirrot AMKA $3 \times 35 + 70 \text{ mm}^2$ riippukierrekaapelin tapauksessa on esitetty kuvassa 3. Kytchentätapana unipolaarijärjestelmän siirto johdolla on käytetty kytkentätapaa kaksi ja bipolaarijärjestelmällä kytkentätapaa yksi, taulukoiden 1 ja 2 mukaisesti. Suurin sallittu jännitteenalenema on 6 %. 1500 VDC unipolaarisella tasasähköjakelujärjestelmällä voidaan siirtää tehoa esimerkiksi 500 m matkalla 13,2 -kertaa enemmän kuin 400 V vaihtosähköjärjestelmällä. Jos käytetään +/- 750 VDC bipolaarijärjestelmää voidaan siirtää tehoa 8,4 -kertainen määrä. (Salonen 2006)



Kuva 3. Maksimitehonsiirtokyky matkanfunktiona tasa- ja vaihtosähköjärjestelmillä käytettäessä AMKA 3x35+70 mm² riippukierrekaapelia käytettäessä. Oletetaan AMKAN soveltuvan käytettäväksi tasajännitteellä. (Salonen 2006)

400 VAC vaihtosähköjärjestelmällä voidaan siirtää 50 kW teho noin 200 metriä, 1500 VDC unipolaarijärjestelmällä voidaan siirtää sama teho noin 3300 metriä ja +/- 750 VDC bipolaarijärjestelmällä noin 1400 metriä.

Tasasähköjärjestelmien tehonsiirtokyky riippuu siitä millä tavoin siirtojohdot on kytketty. Unipolaarijärjestelmän maksimitehonsiirtokyky saadaan aikaiseksi taulukon 1 kytkennällä kaksi, jossa virta jakaantuu meno- ja paluujohtimeen. Bipolaarijärjestelmän maksimitehonsiirtokyky saavutetaan taulukon 2 kytkentä tavalla kaksi. Eri kytkentä tapausten välinen ero johtuu ominaisresistanssin sekä termisen kuormitettavuuden suuruudesta. (Salonen 2006)

6 Tehoelektroniikan toteutustavat

Tasasähköjärjestelmässä tasajännite saadaan aikaiseksi suuntaamalla vaihtojännite tasajännitteeksi tehoelektronisella tasasuuntaajalla. Tasajännite tulee muuttua uudelleen vaihtojännitteeksi tehoelektronisella vaihtosuuntaajalla viimeistään kuluttajan sähköliitännässä, koska kaikki tähän asti suunnitellut kodin sähkölaitteet on mahdollista toistaiseksi kytkeä vain vaihtosähköliitännään. Tehoelektronisten komponenttien kestoikä on lyhyempi kuin verkkokomponenttien, mikä tulee ottaa huomioon tasasähköjärjestelmien teknistaloudellisessa tarkastelussa. Tehoelektronisten laitteiden kestoikää vaikuttavat suurimmaksi osaksi niissä käytettävien puhaltimien ja kondensaattoreiden kestoikä. (Salonen 2006)

Tasasähkönsiirto voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Eräitä vaihtoehtoja ovat: kaksitasoinen DC-jakelu, jossa on yksi 1500 V tasajännitelinkki tai kolmitasoinen DC-jakelu, jossa 1500 V linkki on jaettu kahteen 750 V linkkiin. Kummassakin tapauksessa tasasähkö tuodaan kuluttajalle asti ja vaihtosuunnataan siellä. Kaksitasoisessa jakelussa ongelmia tuottaa asiakkaan päässä oleva invertteri, jossa tarvitaan suuren jännitteen keston omaavia komponentteja. Tällaiset komponentit ovat nykyisillä valmistajilla liian suuria tähän tarkoitukseen, jolloin myös turhan kalliita. Tasasuuntaajassa tämä ei ole ongelma, koska siinä virrat on suuremmat kuin kuluttajan kohdalla. Kolmitasoisessa jakelussa sopivien komponenttien valikoima paranee, koska jännite puolittuu ja tämän vuoksi hinta on alhaisempi. Kolmitasoinen jakelu vaikuttaa tällä hetkeltä paremmalta vaihtoehdolta, koska komponenttien valikoima on laajempi kuin käytettäessä kaksitasoista jakelua. (Nuutinen 2006)

6.1 Suuntaajat

Suuntaajat voivat olla rakenteeltaan aktiivisia tai passiivisia, riippuen suuntaajassa käytettyjen komponenttien rakenteesta. Aktiivisessa suuntaajassa tehoelektroniset komponentit ovat ohjattavissa ja jännitteen suuruus sekä väre tuotettavissa halutuksi, kun

taas passiivisen suuntaajan ulostulojännitteen suuruus sekä taajuus ovat riippuvaisia syöttöjännitteestä. (Salonen 2006)

6.1.1 Tasasuuntaaja

Yleisesti tasasuuntaus on helpompi toteuttaa kuin vaihtosuuntaus, koska siihen ei ole tarvetta liittää yhtä paljon oheislaitteita kuin invertterin yhteyteen. Sähköjakelujärjestelmässä tasasuuntaus voidaan toteuttaa aktiivisena tai passiivisena. Tasasuuntaajan rakenne perustuu perinteisiin puolijohdekomponentteihin, eli diodeihin ja tyristoryihin. Diodien käyttö tasasuuntaajassa on edullisinta, koska ei tarvita ohjauselektronikkaa ja komponentit ovat edullisia. Ongelmaksi diodien käytössä tulee järjestelmän käynnistyessä muodostuvien suurien virtojen hallinta. Tyristoryitä käytettäessä saadaan järjestelmä paremmin säädettäväksi ja käynnistyksessä syntyvien suurten virtojen hallinta on helpompaa. Tyristoryillä toteutettuja siltoja on käytetty jo pitkään suurjännitetasasähköjärjestelmissä. Tyristoryien käyttö tulee diodeja kalliimmaksi, koska komponentit ovat kalliimpi ja tarvitaan ohjauselektronikkaa. Hintaaero ei luultavasti muodostu ongelmaksi, koska tehoelektronikan hinnat laskevat koko ajan. Tyristoryillä suuntaaja voidaan toteuttaa joko kokonaan tai puoliksi ohjatusti. Täysin ohjatulle sillalle ei ole tarvetta, joten tasasuuntaajana voidaan käyttää puoliksi ohjattua siltaa, jossa puolet tyristoryistä on korvattu diodeilla. (Nuutinen 2006; LTY 2005b)

Tasasähköjärjestelmän peruskomponenttina toimii 6-pulssisilta, joita on suuntaajasta riippuen yksi tai kaksi kappaletta. Käytettäessä kahta 6-pulssisiltaa tasajännitteen pulssiluku kaksinkertaistuu, jolloin se tuottaa pienemmän väreen tasajännitteeseen. 12-pulssisillan etuna on myös verkosta otetun virran harmonisten pienempi määrä. Kaksi 6-pulssisiltaa voidaan kytkeä joko rinnan tai sarjaan. Kummassakin kytkentä tapauksessa kuusipulssisiltoja syöttävien muuntajien kytkentäryhmän tulee tuottaa siltojen syöttöjännitteiden välille 30 asteen vaihesiirto. (Salonen 2006)

Tasasuuntaajasillan avulla saatu tasajännite riippuu syöttöjännitteestä. Tasasähköyhteyden alkupäässä tarvitaan jakelumuuntaja muuttamaan 20 kV keskijännite 1 kV pienjännitteeksi ennen tasasuuntauksen tekemistä. 1000 V vaihtojännitteestä saadaan 6-pulssisella tasasuuntaajasillalla noin 1350 VDC ja 12-pulssisella tasasuuntaajalla noin 1398 VDC. Äärettömän kapasitanssin vaikutus nostaa jännitteiden arvoksi noin 1414 VDC, joka on noin 94 % osuus suurimmasta sallitusta 1500 VDC pienjännitteestä. Sallittu 1500 VDC tasajännite saadaan aikaiseksi ainoastaan sarjaankytketyllä 12-pulssisuuntaajalla. (Salonen 2006)

6.1.2 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajat on toteutettava aktiivisin komponentein, jolloin käyttöjännite saadaan pidettyä lähellä 230/400 VAC nimellisarvoa, vaikka tasasähkölinkin jännitteenalenema olisi huomattava. Pienin tasajännite, jolla saadaan kuluttajalle aikaiseksi täysimääräinen käyttöjännite, riippuu käytettävän vaihtosuuntaajan ominaisuuksista. Esimerkiksi käytettäessä kokosiltavaihtosuuntaajaa yksivaiheisen 230 V vaihtojännitteen muodostamiseksi tasasähkölinkin jännitteen on oltava vähintään 325 VDC. Aktiivisella vaihtosuuntauksella asiakkaan käyttöjännite voidaan lähes vakioda halutulle jännitetasolle. Pienestä tasajännitteen minimiarvosta on hyötyä verkon erilaisissa häiriötilanteissa, koska asiakkaan tarvitsema jännite voidaan tuottaa hyvin laajasta DC-linkin jännitteen vaihteluvälistä. Jännitekuopat, ylijännitteet ja jännitetason vaihtelut voidaan aktiivisen jännitteen säädön avulla korjata käyttäjän liitännässä. Yksivaiheinen vaihtosuuntaaja voidaan toteuttaa joko koko- tai puolisolainvertterin avulla. Puolisolainvertteri koostuu kahdesta tehokytkimestä, nolladiodista sekä kondensaattorista. Kokosolainvertterin hinta on korkeampi, koska siinä on kaksinkertainen määrä kytkimiä ja monimutkaisempi ohjauselektronikka kuin puolisolainvertterillä. Pienjännitetasasähköjärjestelmän vaihtosuuntaajana voidaan käyttää puolisolainvertteriä, koska taajuus pysyy vakiona ja invertterin käsittelemä teho on myös melko pieni. Lähtöjännitteen huippuarvo on myös tarpeeksi suuri puolisolainvertterillä yksivaiheista vaihtosähköä ajatellen. (Nuutinen 2006; Salonen 2006)

6.1.3 Suuntaajien häviöt

Tehoelektronisten suuntaajien tehohäviöt muodostuvat päästö-, vuoto-, kytkentä-, katkaisu-, johtumis- ja ohjaushäviöistä. Tehohäviöt pienentävät suuntaajien hyötysuhdetta ja samalla myös koko jakelujärjestelmän kokonaishyötysuhdetta. Jakelumuuntaja voidaan korvata tehoelektronisella suuntaajalla, jos vertailukohtana pidetään pelkästään tehohäviöitä, koska tehoelektronisten suuntaajien kokonaishyötysuhde on suunnilleen samalla tasolla kuin tehomuuntajien hyötysuhteet. Unipolaarisessa järjestelmässä tyhjäkäyntihäviöt voidaan määrittää hyötysuhteen, tyhjäkäyntihäviöprosentin ja nimellistehon avulla. Bipolaarijärjestelmässä tarvitaan oma suuntaajayksikkö kummallekin jännitetasoille, jolloin tyhjäkäyntihäviöt ovat kaksinkertaiset unipolaarijärjestelmään verrattuna. Määritettäessä tyhjäkäyntihäviöteho nimellistehosta saadaan suurin mahdollinen arvo vastaten huonointa mahdollista tilannetta. Tyhjäkäyntihäviö on todellisuudessa pienempi kuin saatu arvo. Suuntaajayksikön kuormitushäviöt voidaan myös määrittää kuormitushäviöprosentin avulla. Bipolaarijärjestelmän suuntaajissa tulee ottaa huomioon kuormituksen jakautuminen eri jännitetasojen kesken. Jos kuormitus ei jakaannu tasoille tasan, on kuormitushäviö määritettävä erikseen eri jännitetasoille.

6.2 Suodatuslaitteet

Suuntaajia käytettäessä aiheutuu verkkoon yliaaltoja, jotka näkyvät sekä kuluttajalla että verkossa. Yliaallot saattavat heikentää kuluttajan kokemaa jännitteenlaatua. Jännitteen laadun alentuminen, joka aiheutuu verkkohäiriöistä, ei ole niin suuri, että se vaikuttaisi tekniikan käyttöönottoon. Suuntaajien aiheuttamien häiriöiden ehkäisemiseksi voidaan käyttää erilaisia tehoelektroniikalla toteutettuja suodatin ratkaisuja. Suodattimet voivat olla joko aktiivisia tai passiivisia, riippuen tarvittavasta suodatustarpeesta. Suodattimet pienentävät muuttajan kokonaishyötysuhdetta ja monimutkaistavat muuttajan rakennetta. (Nuutinen 2006; Salonen 2006)

Kullekin harmoniselle yliaallolle on määritelty erikseen standardoinnissa jakelujännitteen harmonisten yliaaltojen sallitut suhteelliset maksimiarvot. Epäharmonisille yliaaltojen määrälle ei ole jakelujännitteen yleisissä vaatimuksissa määritelty arvoja. Yliaaltojen erilaisilta haittavaikutuksilta jakeluverkon toimintaan voidaan välttyä pitämällä yliaaltojen määrä mahdollisimman alhaisena. Virta- ja jänniteyliaallot aiheuttavat muun muassa suurempia tehohäviöitä eri verkkokomponenteissa, mittalaitteiden epätarkkaa toimintaa, jännitteen vääristymistä, jännitepiikkejä, sulakkeiden turhaa palamista, suojareleiden epävarmaa toimintaa ja resonanssi-ilmiöitä. (SFS 50160; Salo 1993)

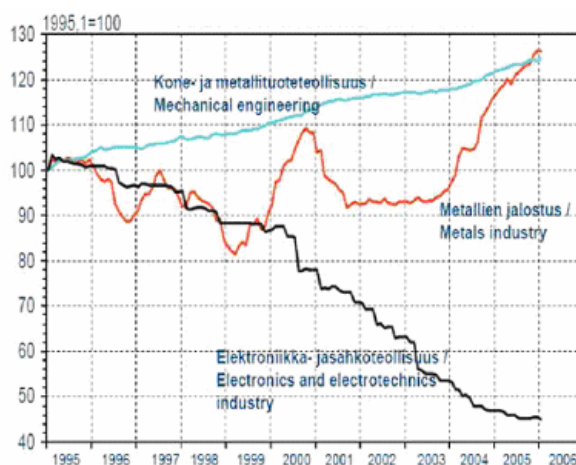
Tasasähköjärjestelmissä käytettävien vaihtosuuntaajien lähtöjännitteen käyrämuoto on suodatettava, jotta sähkökäyttäjän käyttöjännitteen ylijännitteet pysyvät sallituissa rajoissa. Suodatus voidaan toteuttaa esimerkiksi LC- tai LCL -suodattimen avulla. Suodattimen aiheuttamien kustannuksen takia ei kannata tehdä tarvittavaa monimutkaisempaa suodatinta. Tasasähköjärjestelmän muuntopiirissä voidaan tarvita jopa kymmeniä vaihtosuuntaajia, jolloin verkosta otettavan virran suuruus voi nousta huomattavan korkeaksi ja tällöin tarvitaan suodatin myös tasasuuntaajan yhteyteen. Tasasuuntaajalla pyritään myös jännitteen ja virran käyrämuotojen suodattamisen lisäksi korjaamaan verkosta otetun tehon tehokerrointa. (Nuutinen 2006; Salonen 2006)

7 Tasasähköjärjestelmän teknistaloudelliset käyttömahdollisuudet

Tasasähköjärjestelmällä on hyvät käyttömahdollisuudet haja-asutusalueella Suomessa. Maaseudulla suurin osa asiakkaan kokemista keskeytyksistä aiheutuu keskijänniteverkon vioista. Tasasähköjakelulla voidaan lyhentää jakeluverkon keskijännite johtopituuksia, jolloin myös keskeytyskustannukset pienentyvät. Kaupungeissa tehonkulutus lisääntyy kokoajan ja sähkön laadulle sekä saannin luotettavuudelle asetetaan korkeampia vaatimuksia. Tasasähköjakelun yleistyminen tietyissä sovelluksissa mahdollistaisi hajautetun tuotannon edullisen ja joustavan verkkoon liittäjän sekä saarekekäytön toteutumisen. (Verkkovisio 2006)

7.1 Tehoelektronisten komponenttien hintakehitys

Elektroniikka laitteiden hinnat ovat laskeneet viime vuosikymmenien aikana, kun samanaikaisesti kone- ja metalliteollisuuden hinnat ovat nousseet. Tämä on mahdollistanut ajatukset tasasähkön käytöstä jakelujärjestelmässä. Kuvan 4 mukaisesti elektroniikka laitteiden hinnat ovat vuosien 1995-2006 aikana laskeneet puoleen, joka lisää tasasähköjärjestelmien käyttömahdollisuutta. (Verkkovisio 2006)



Kuva 4. Teollisuuden hintakehitys vuosina kone- ja metalliteollisuudessa sekä elektroniikka ja sähköteollisuudessa vuosina 1995-2006. (Verkkovisio 2006)

7.2 Tehoelektronisten suuntaajien hinnat

Suuntaajien komponenttien hintoja tarkasteltaessa voidaan sähköjakelussa käytettäville tehoelektronisille suuntaajille arvioida hinnat, kun arvioidaan suunnittelulle ja rakennuttamiselle jonkin suuruiset prosentuaaliset lisät. Tämän työn teknistaloudellisen tarkastelun pohjatietoina on käytetty aiemmassa karkeassa tutkimuksessa arvioituja suuntaajien hintoja. (LTY 2005b; Salonen 2006)

Aiemmat arviot tasasähköyhteyksien mahdollisesta käytettävästä tehoalueesta on vaikuttanut suuntaajien tehoalueiden valintaan. Tasasuuntaajien hintoja on arvioitu 50 kVA ja 100 kVA teholuokille. Tasasuuntaajien hinta-arviot on tehty vain 6-pulssisuuntaajille ja bipolaarijärjestelmässä on oletettu käytettävän kahta unipolaarijärjestelmän suuntaajaa. Taulukossa 3 on esitetty tasasuuntaajien hinta-arviot. (Salonen 2006)

Taulukko 3. Karkeat hinta-arviot tasasuuntaajille (LTY 2005b)

Teho [kVA]	Syöttöjännite [VAC]	Lähtöjännite [VDC]	Ohjaus	Vaiheita	Unipolaari hinta [€]	Bipolaari hinta [€]
50	1000	1400	Passiivinen	3	2000	4000
100	1000	1400	Passiivinen	3	4000	8000

Vaihtosuuntaajien hinta-arvioissa on tehty ainoastaan yhden kokoluokan suuntaajalle, mutta arvioita on esitetty eri järjestelmätapauksiin sopiville määrille erisuuruisia jännite ja vaihelukumäärien vaihtoehtoja. Vaihtosuuntaajien hinta-arviot on myös tehty 6-pulssisuuntaajalle. Bipolaarijärjestelmien vaihtosuuntaajien yhteishinta on myös kaksinkertainen. Taulukossa 4 on esitetty hinta-arviot vaihtosuuntaajille. (Salonen 2006)

Taulukko 4. Karkeat hinta-arviot vaihtosuuntaajille (LTY 2005b)

Teho [kVA]	Syöttöjännite [VAC]	Lähtöjännite [VDC]	Ohjaus	Vaiheita AC	Unipolaari hinta [€]	Bipolaari hinta [€]
10	800	400	Aktiivinen	1	1500	3000
10	800	400	Aktiivinen	3	2000	4000
10	1400	400	Aktiivinen	1	2200	4400
10	1400	400	Aktiivinen	3	2800	5600

Hinta-arviot on tehty sillä perusteella, että oletetaan suuntaajia voitavan kytkeä kuormitukseen rinnan tarvittava määrä siten, että saavutetaan tarvittava tehonsiirtokyky. Suuntaajien hinnoissa ei ole huomioitu rinnankytkentään tarvittavan tekniikan aiheuttamaa lisäkustannusta, vaan se on oletettu sisältyvän kyseisiin hintoihin. (Salonen 2006)

7.3 Hajautettu tuotanto

Tasasähköjärjestelmillä on hyvä hajautetun tuotannon liitettävyyys pienjänniteverkkoon, koska pienvoimalat olisi mahdollista kytkeä tasajänniteportaaseen. Verkkoon kytkennässä käytettävien suuntaajien rakenne olisi mahdollista toteuttaa yksinkertaisemmin kuin aikaisemmin. (Salonen 2006)

Kaupunkijakeluverkoissa syötön varmennus voidaan toteuttaa pienjännitteisen tasasähköjakelun yhteydessä olevalla energiavarastolla. Keskijänniteverkko on varmennettu automaatiolla, mutta jos tasasähköverkossa on riittävä energiavarasto, ei keskijänniteverkon automaatiolle tarvitse asettaa suuria vaatimuksia. (Verkkovisio)

Hajautettua tuotantoa käytettäessä tasasähköverkko kytketään vaihtosähköverkkoon kahden kolmivaiheisen verkkovaihtosuuntaajan kautta pwm-tekniikalla (VSC). Toinen suuntaajista on varastossa luotettavuuden parantamiseksi ja saarekekäytön hallinnan helpottamiseksi. Saarekekäytön hallinnan muun jakeluverkon turvallisuuden kannalta olisi parasta, mikäli ac/dc rajapinnan yhdistäviä suuntaajia olisi vain yksi kappale. Virralla ohjataan pwm-modulointia, jolloin hetkelliseen vaihevirran täytyy seurata sinimuotoista jännitereferenssiä. Jänniteohjattuun pwm-ohjaukseen verrattuna etuina on ohjauksen stabiilisuus ja helpompi toteutus. Verkkoon on liitetty patteri lyhyitä keskeytyksiä varten. Akusto liitetään tasajänniteverkkoon hakkurilla. Akut ovat lyijyakkuja, jotka tasaavat jännitettä saarekekäytön aikana ja latautuvat normaalin verkonkäytön aikana. Hajautetulla tuotannolla voidaan tarkoittaa dieselgeneraattoreita, jotka kytetään tasajänniteverkkoon diodisillalla. (Brenna 2006)

Tasasähköverkkoon liitetyn valvontaohjelman tehtävänä on huolehtia, etteivät sähkölaitteiden ohjaukset vaikuta toisiinsa tai aiheuta korkeita transientteja. Valvontaohjelma antaa laitteille käskyt ja rajoitusarvot. (Brenna 2006)

Diodisillalla toteutetulla suuntauksella on korkea hyötysuhde ja luotettavuus. Tehoa voidaan kuitenkin siirtää vain yhteen suuntaan, jolloin ratkaisu ei ole käyttökelpoinen lähdölle, joka syöttää hajautetuntuotannon tehoa takaisin keskijänniteverkkoon. Diodisiltasuuntaaja ei sisällä ohjauslogiikkaa, joten vaihtojännitepuolen jännitemuutokset näkyvät herkemmin tasajänniteportaassa. Dioditoteutus on kuitenkin paras vaihtoehto kolmesta vaihtoehdosta, koska sen toteutus on yksinkertainen ja luotettava. (Brenna 2004)

Diodisillan kanssa voidaan liittää rinnan pieni tehoinen invertteri, jolloin tuotannon ylittäessä kulutuksen voidaan siirtää tehoa siirtoverkkoon päin. Tällöin invertterin toteutuksessa riittäisi toiminta dc/ac suuntaan. (Brenna 2004)

Kolmas vaihtoehto on pakkokommutoitu IGBT suuntaaja. IGBT suuntaajalla voidaan rajoittaa absorboituneita ja injektointuneita virtoja vaihtovirtapuolella kuristimien avulla. IGBT:n korkeammasta kytkentätaajuudesta johtuen saadaan etua ylävirtaan sijoitettavien korkeataajuisten LC suodinten pienemmästä koosta verrattuna dioditoteutukseen. Suuntaajan säätö mahdollistaa jännitteen paremman vakauden tasavirtapuolella. IGBT toteutus mahdollistaa mm. verkon keskeytysten ja jännitekuoppien kompensoinnin parantaen sekä tasa- että vaihtosähköverkon sähkönlaatua säädettävyytensä johdosta. (Brenna 2004)

7.4 Pienjännitetasasähköjakelun teknistaloudellinen tarkastelu

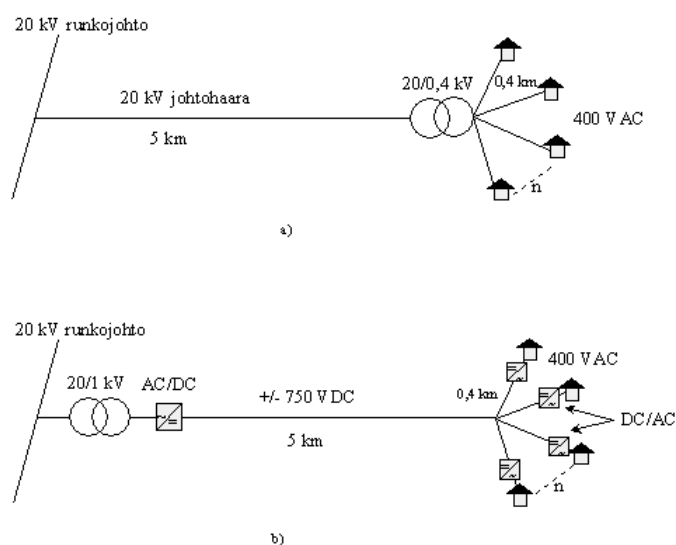
Sähkönjakeluverkon teknistaloudellisen tarkastelun tarkoituksena on löytää jakelujärjestelmä joka täyttää tekniset reunaehdot ja on taloudellisesti kannattavampi kuin vaihtoehtoiseen jakelujärjestelmään verrattuna. Nykyarvomenetelmää käytetään

taloudellisuuden tarkasteluun, jossa järjestelmän pitoajalta aiheutuvat kustannukset arvostetaan nykyarvoon. (Salonen 2006)

Teknitaloudellisella tarkastelulla voidaan määrittää alue, jossa kyseinen jakelujärjestelmä on kannattava. Teknitaloudellinen käyttöalue sähköverkoille määräytyy siirtotehon sekä siirtopituuden funktioiden rajaaman alueen perusteella. Järjestelmän teknisen suorituksen sekä nykyarvomenetelmään perustuvan järjestelmien välisen teknitaloudellisen kannattavuuden mukaisesti määräytyvät teknitaloudellisen alueen rajat. Käyttöalueen rajat riippuvat komponenttien hinnoista ja laskentaparametreista. Teknitaloudellinen laskenta perustuu kokonaiskustannusfunktion minimointiin. Kokonaiskustannuksiin kuuluu pitoajan kaikki kustannukset, jotka järjestelmän suunnittelusta, rakentamisesta, käyttämisestä tai ylläpitämisestä aiheutuvat. Tekniset vaatimukset määräytyvät laitteiden kestoisuuksista tai olemassa olevasta lainsäädännöstä. (Lakervi 1996; Salonen 2006)

7.4.1 Esimerkkiverkko

Tarkastellaan teoreettisen esimerkkiverkon avulla keskijännitehaarajohdon korvaamista, jossa keskijännitehaaran pituus on 5 km ja johtohaaran päässä on 5 sähkökäyttäjän muuntopiiri. Sähkökäyttäjien liitännät ovat 0,4 km/asiakas pitkät, jolloin pienjänniteverkon kokonaispituus on 2 km. Tarkastelussa on käytetty mitoitustehona 10 kW/asiakas. Kuormien risteilyä ei ole otettu huomioon tarkastelussa. Sallittu jännitteenalenema käyttäjän sähköliitännässä on 10 %. Kuvassa 5 on esitetty teoreettinen esimerkkiverkko.



Kuva 5. Teoreettinen esimerkkiverkko, jossa a) on perinteinen 20/0,4 kV jakelujärjestelmä, b) bipolaaritasasähköjärjestelmä.

Taulukossa 5 on esitetty tarkastelussa käytetyt laskentaparametrit.

Taulukko 5. Teknistaloudellisen tarkastelun laskentaparametrit (Salonen 2006)

Laskentaparametri	Arvo
Pitoaika [a]	40
Tehonkasvu-aika [a]	40
Häviöiden huipunkäytönaika [h]	1000
Laskentakorko [%]	5
Tehokerroin	0,95
Vuotuinen tehonkasvuprosentti [%/a]	0
Häviötehon hinta [€/kW]	30
Häviöenergian hinta [€/kW]	0,03
Viankorjauskustannukset kj-ilmajohto [€/km]	1640
Viankorjauskustannukset pj-ilmajohto [€/km]	1600
Ylläpitokustannukset kj-ilmajohto [€/km]	95
Ylläpitokustannukset pj-ilmajohto [€/km]	20
Keskeytyskustannukset kj-ilmajohto [€/km]	10 500
Tehon KAH arvo, kotitalous [€/kW]	0,068
Energian KAH arvo, kotitalous [€/kW]	0,61
Vikatiheys kj-ilmajohto, maaseutu [kpl/km]	0,0537
Vikatiheys pj-ilmajohto, maaseutu [kpl/km]	0,0176

Karkeassa tarkastelussa määritellään eri jakelujärjestelmissä kuluvat häviötehot tarvittavissa muuntajissa, tehoelektronisissa suuntaajissa sekä siirtojohdoissa. Tarkastelu on tehty bipolaarijärjestelmälle, jossa asiakasliitännät on tehty unipolaarisella liitännällä maan ja vaiheen väliltä. Jakelujärjestelmään kuuluu yksi bipolaarinen tasasuuntaaja ja

viisi vaihtosuuntaajaa, koska kunkin sähkökäyttäjän pienjänniteliitintään tarvitaan yksi 10 kVA vaihtosuuntaaja. Bipolaarijärjestelmän tasasuuntaaja muodostuu kahdesta suuntaaja yksiköstä, jolloin kummankin jännitetason suuntaajayksikön huipputeho on 50 kVA. Bipolaarijärjestelmän kuormitus on kytketty tasan jännitetasojen kesken. Muuntajien tehot ovat 50 kVA. Tarkastelussa olevien suuntaajien kuormitushäviöiden osuus on noin 96 % kokonaishäviöistä, jolloin tyhjäkäyntihäviöiksi jää noin 4 % kokonaishäviöistä. Taulukossa 6 on esitetty jakelujärjestelmien tarkastelussa käytettävien komponenttien häviöparametrit.

Taulukko 6. Eri jakelujärjestelmien häviöparametrit. (Salonen 2006)

Komponentti	Tyhjäkäyntihäviö P [W]	Kuormitushäviö P [W]
Muuntajat 20/0,4 & 20/1 kV	140	$(S/S_n)^2 \cdot 885$
Bipolaarinen tasasuuntaaja	2kpl·50kVA·0,04·0,04	2kpl· $(S/S_n)^2 \cdot 50kVA \cdot 0,04 \cdot 0,96$
Unipolaarinen vaihtosuuntaaja	5kpl·10kVA·0,04·0,04	5kpl· $(S/S_n)^2 \cdot 10kVA \cdot 0,04 \cdot 0,96$

Tehoelektroniikan osalta tyhjäkäyntihäviöt on laskettu nimellistehosta eli määritetty huonoimman tilanteen mukaisesti, jolloin tyhjäkäyntihäviöt ovat todellisuudessa saatuja arvoja pienemmät. Järjestelmän tyhjäkäyntihäviöt on esitetty liitteessä 1 taulukossa 1. Vertailtaessa jakelujärjestelmien tyhjäkäyntihäviöitä, voidaan havaita tasasähköjärjestelmän tyhjäkäyntihäviöiden olevan noin 2,7 kertaa suuremmat kuin perinteisen 20/0,4 kV jakelujärjestelmän tyhjäkäyntihäviöt. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi bipolaarisesta tasasuuntaajasta, koska käytettäessä tasasuuntaajaa molemmille jännitetasoille 50 kVA tasasuuntaajaa, on tyhjäkäyntihäviöt laskettu kaksinkertaisesta nimellistehosta. Järjestelmän kuormitushäviöt on esitetty liitteen 1 taulukossa 2, josta voidaan havaita tasasähköjärjestelmän kuormitushäviöiden olevan noin 4 kertaa suuremmat kuin perinteisellä 20/0,4 kV järjestelmällä. Asiakkailta sijaitsevat vaihtosuuntaajat aiheuttavat erityisesti kuormitushäviöitä, jopa 2-kertaa enemmän kuin tasasuuntaajat. Liitteen 1 taulukossa 3 on esitetty eri jakelujärjestelmien muuntajissa aiheutuvat tehohäviökustannukset tarkastelun pitoajalta. Taulukosta voidaan havaita tasasähköjärjestelmän tehohäviökustannusten olevan noin 3,5-kertaa suuremmat kuin perinteisellä 20/0,4 kV jakelujärjestelmän tehohäviökustannukset.

Tarkastelussa käytettävien 4-johtimisten pienjännite maakaapeleiden hinnat 20/0,4 kV jakeluverkolle on laskettu kaavalla 30 (Salonen 2006).

$$K_m = K_{auraus} + \frac{1}{2} K_{johto} + \frac{n_{johdin}}{4} \left(\frac{1}{2} K_{johto} + K_{pa} A_{pa} \right) \quad (30)$$

$$= 1800 + 458 + \frac{n_{johdin}}{4} (458 + 80 A_{pa})$$

Jossa K_m on maakaapelin investointikustannus [€/km]
 K_{auraus} on aurauksesta aiheutuva kustannuskomponentti [€/km]
 K_{johto} on johdon valmistuksesta aiheutuva vakiosuuruinen kustannuskomponentti [€/km]
 K_{pa} on määritetty vakio poikkipinnan suhteen [€/km]
 A_{pa} on johdon poikkipinta [mm²] ja
 n_{johdin} on johtimien lukumäärä [kpl].

Verkon investointikustannuksien laskuissa käytettävät verkkokomponentit on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Tasa- ja vaihtojärjestelmissä käytettävät verkkokomponentit.

Verkkokomponentti	20/0,4 kV	+/- 750 VDC
KJ haara johto [mm ²]	Raven	120
PJ verkon johto [mm ²]	35	10
Muuntajat 20/0,4 & 1/0,4 kV [kVA]	50	-
Muuntajat 20/1 kV [kVA]	-	50

Hintafunktion avulla on jakelujärjestelmässä käytettäville maakaapeleille määritetty yksikköhinta kilometriä kohden. Liittymisjohdon kaapelit oletetaan olevan kaksijohtimisia ja runkojohdon kolmijohtimisia. Tarkasteltavan tasasähköjärjestelmän kaapeleiden hintoina on käytetty aikaisemmassa tutkimuksessa laskettuja arvoja. Hintojen määrittämisessä ei ole huomioitu suunnittelusta aiheutuvia kustannuksia uudelle tuotteelle, vaan kaapeleiden on oletettu maksavan saman verran kuin vastaava rakenteinen vaihtosähkökaapeli. Eri jakeluverkkojen kokonaiskustannukset on esitetty taulukossa 8. Kustannukset eivät sisällä tehoelektronisten suuntaajien investointi- ja häviökustannuksia.

Taulukko 8. Eri jakelujärjestelmien kokonaiskustannukset ilman tehoelektronisten suuntaajien investointi- ja häviökustannuksia.

Kustannus	20/0,4 kV	+/- 750 VDC bipolaari
Investointi [k€]	108,7	63,8
Häviöt [k€]	1,8	4,9
Keskeytyskustannukset [k€]	52,6	0,4
Ylläpitokustannukset [k€]	8,8	2,4
Viankorjauskustannukset [k€]	8,5	3,4
Yhteensä [k€]	180,5	74,9

Taulukosta 8 voidaan huomata, että tasasähköjärjestelmän kokonaiskustannukset ovat huomattavasti pienemmät kuin perinteisen 20/0,4 kV jakelujärjestelmän, kun tehoelektronisten suuntaajien kustannuksia ei huomioida. Perinteisen 20/0,4 kV suuret kokonaiskustannukset johtuvat suurista keskeytyskustannuksista ja investointikustannuksista. Jakeluverkon toteuttaminen tasasähköjärjestelmällä on 58 % edullisempää kuin perinteisellä 20/0,4 kV jakelujärjestelmällä. Tasasähköjärjestelmässä voidaan käyttää pienempää poikkipintaa johdoissa kuin perinteisessä 20/0,4 kV jakelujärjestelmässä, minkä takia investointikustannukset ovat alhaisemmat. Perinteisessä 20/0,4 kV verkossa suuret keskeytyskustannukset aiheutuvat suurimmaksi osaksi keskijänniteverkossa aiheutuvista vioista. Tasasähköjärjestelmä on kannattava vain jos kustannuserolla voidaan kattaa kaikki tehoelektroniikkalaitteiden aiheuttamat kustannukset pitoajalta, joita ovat investointi-, huolto-, ylläpito-, ja viiankorjauskustannukset sekä häviökustannukset.

Tarkasteltavassa verkossa tarvitaan kaksi kappaletta 50 kVA tasasuuntaajyksikköä ja viisi kappaletta 10 kVA vaihtosuuntaajaa. Tehoelektronisista suuntaajista aiheutuvat kustannukset on esitetty taulukossa 9, jossa oletetaan suuntaajien eliniän kestävän koko pitoajan. Suuntaajien hyötysuhteen on arvioitu olevan 0,96 määritettäessä häviökustannuksia.

Taulukko 9. Tehoelektronisten suuntaajien kustannukset tarkasteltavaan verkkoon, kun suuntaajien käyttöikä on yhtä suuri kuin pitoaika.

Tehoelektronikan kustannukset	Kustannus [k€]
Tasasuuntaajan investoinnit (2 kpl, 50kVA)	4
Vaihtosuuntaajien investoinnit (5 kpl, 10 kVA)	7,5
Tasasuuntaajan häviöt	0,4
Vaihtosuuntaajien häviöt	0,5
Yhteensä	12,4

Lisäämällä tasasähköjärjestelmän kustannuksiin tehoelektronisista suuntaajista aiheutuvat kustannukset, jolloin saadaan tasasähköjärjestelmän kokonaiskustannuksiksi noin 87 k€ kun oletetaan tehoelektronikkalaitteiden kestävän kokopitoajan. Perinteisen 20/0,4 kV jakelujärjestelmän häviökustannukset ovat noin 63 % edullisemmat kuin tasasähköjärjestelmän, kun taas perinteisen 20/0,4 kV keskeytyskustannukset ovat yli 99 % kalliimmat kuin tasasähköjärjestelmällä. Verkon toteuttaminen tasasähköjärjestelmällä on 51 % edullisempaa kuin perinteisellä 20/0,4 kV jakelujärjestelmällä.

Tarkastelussa on oletettu suuntaajien kestävän toimintakuntoisina kokopitoajan. Tehoelektronisten suuntaajien käyttöikä on kuitenkin lyhempi kuin perinteisten verkkokomponenttien, jolloin suuntaajat tulee uusia pitoajan kuluessa. Jos suuntaajien hinnat oletetaan pysyvän nykyisellä hintatasolla, voidaan järjestelmien kustannuserosta arvioida uusimiskertojen lukumäärä. Perinteiseen jakelujärjestelmään verrattuna kustannusero mahdollistaa tehoelektronisten suuntaajien korvaamisen 7-8 kertaa.

8 Yhteenveto

Suomalaisessa sähköjakelujärjestelmässä tasasähköjakelulla voi olla suuretkin käyttömahdollisuudet. Haja-asutusalueella suurin osa asiakkaan kokemista keskeytyksistä aiheutuu keskijänniteverkon vioista. Tasasähköjakelulla voidaan lyhentää jakeluverkon keskijännite johtopituuksia, jolloin myös keskeytyskustannukset pienentyvät. Tasasähköjakelun yleistyminen tietyissä sovelluksissa voisi mahdollistaa hajautetun tuotannon edullisen ja joustavan verkkoon liittäjän sekä saarekekäytön toteutumisen.

Tasasähköjärjestelmällä voidaan parantaa sähkönlaatua ja toteuttaa entistä edullisempi jakelujärjestelmä. Sähkökäyttäjille sähkönlaadun parantuminen näkyy sekä jännitteen laadun että toimitusvarmuuden parantumisena.

Keskijänniteverkossa voidaan sallia vikatapauksen sattuessa suurikin jännitteen alenema, koska tasasähköyhteys kykenee aktiivisen vaihtosuuntaajan avulla tuottamaan sähkökäyttäjän tarvitseman käyttöjännitteen. Tasasähköyhteydellä parannetaan myös jakeluverkon toimitusvarmuutta, koska tasasähköjärjestelmä muodostaa tasasähköjohtohaaralle oman suojausalueensa. Suojausalueesta johtuen sähkökäyttäjien keskimääräinen keskeytysten lukumäärä laskee parantaen toimintavarmuutta.

Pienjännitedirektiivin määrittely suuremmasta maksimipienjännitteestä sekä tasajännitteen suurempi tehollisarvo ovat mahdollistaneet suuren tehonsiirtokyvyn. Suuri tehonsiirtokyky mahdollistaa pienitehoisten keskijännitejohtojen korvaamisen kevyemmällä pienjännitejohtorakenteella sekä pienjännitekaapeleiden korvaamisen poikkipinnaltaan pienemmillä kaapeleilla verrattuna vaihtosähköjärjestelmään. Kummatkin tapaukset pienentävät verkon investointikustannuksia.

Tasasähköjärjestelmien teknistaloudellinen käyttöalue riippuu suurimmaksi osaksi suuntaajien kustannuksista, käyttöiästä sekä lukumäärästä. Tehoelektronisten laitteiden hinnat ovat laskeneet alle puoleen viimeisen kymmenen vuoden aikana, joka lisää tasasähköjärjestelmän käyttömahdollisuuksia. Tasasähköjärjestelmän kannattavuutta on

lisännyt myös metalliteollisuuden tuotteiden hinnan nousu, jonka nousu vaikuttaa erityisesti muuntajien hintoihin.

.

Lähteet

- (Brenna 2004) Brenna, M. Tironi, E. Ubezio, G. Proposal of a Local dc Distribution Network with Distributed Energy Resources. 2004. Konferenssi julkaisu. IEEE 2004.
- (Brenna 2006) Brenna, M. Lazaroiu, G.C. Student Member. IEEE. Tironi, E. High Power Quality and DG Integrated Low Voltage dc Distribution System. 2006. Konferenssi julkaisu. IEEE 2006.
- (Kaipia 2006) Kaipia, T. Salonen, P. Lassila, J. Partanen, J. Possibilities of the Low Voltage DC Distribution Systems. 2006. Konferenssi julkaisu. NORDAC 2006.
- (Lakervi 2006) Lakervi, E. 1996. Sähköjakeluverkkojen suunnittelu. Helsinki, Otatieto. 110 s. ISBN 951-672-220-2
- (Lohjala 2005) Lohjala, J. 2005. Haja-asutusalueiden sähköjakelujärjestelmien kehittäminen - Erityisesti 1000 V jakelujännitteen käyttömahdollisuudet. Väitöskirja, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 205. ISBN 952-214-020-1
- (LTY 2005a) 20/1/0,4 kV sähköjakelujärjestelmä, tutkimusraportti. 2005. Sähkömarkkinalaboratorio. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa: <http://www.ee.lut.fi/fi/lab/sahkomarkkinat/>
- (LTY 2005b) Kenttälä, T. 2005. Tehoelektroniikan soveltamismahdollisuudet. Julkaisematon tutkimusraportti. Sähkömarkkinalaboratorio. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

- (Mörsky 1994) Mörsky, J. Mörsky, J. 1994. Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka. Helsinki, Otatieto. 300 s. ISBN 951-672-184-2
- (Nuutinen 2006) Nuutinen, P. 2006. Tasajännitejakelujärjestelmän laboratoriotyyppin suunnittelu ja simulointi. Erikoistyö. Sähkötekniikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- (Paavola 1975) Paavola, Martti. 1975. Sähköjohdot. Porvoo, WSOY. 320 s. ISBN 951-0-06635-4
- (Salo 1993) Salo, J. Pyrhönen, J. 1993. Tehokertoimen aktiivinen parantaminen. Opetusmoniste EN C-60. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. ISBN 951-763-775-6
- (Salonen 2006) Salonen, P. 2006. Tasasähkön hyödyntämismahdollisuudet sähköjakelussa. Diplomityö. Sähkötekniikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- (SFS 2200) SFS 2200. 2005. 0,6/1 kV riippukierrekaapeli AMKA. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto ry.
- (SFS 4879) SFS 4879. 1995.0,6/1 kV voimakaapelit. PEX-eristeiset AL-johtimiset kaapelit. Rakenne ja testaus. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto ry.
- (SFS 4880) SFS 4880. 1995.0,6/1 kV voimakaapelit. PVC-eristeiset ja -vaippaiset kaapelit. Rakenne ja testaus. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto ry.

- (SFS 5800) SFS 5800. 1995. 0,6/1 kV voimakaapelit. Yleiset vaatimukset ja testaus alhaisessa lämpötilassa. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto ry.
- (SFS 5546) SFS 5546. 1995. 0,6/1 kV voimakaapelit. Halogeenittomat nippuna itsestään sammuvat kaapelit. Rakenne ja testaus. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto ry.
- (SFS 6000) SFS 6000. Pienjännitesähköasennukset. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto ry.
- (SFS-EN 50160) SFS-EN 50160. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Helsinki, Suomen Standardoimisliitto ry.
- (Verkkovisio 2006) Verkkovisio 2030, Jakelu- ja alueverkkojen teknologiavisio. VTT tiedotteet. 2006. Saatavissa:
<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2361.pdf>

Taulukko 1. Eri jakelujärjestelmissä muuntajissa kuluvat tyhjäkäyntihäviöt

Jakelujärjestelmä	20/0,4 kV	Tasasähköjärjestelmä
Muuntajat 20/0,4 & 20/1 kV [W]	140	140
Tasasuuntaaja 50 kVA (2 kpl) [W]	-	160
Vaihtosuuntaaja 10 kVA (5 kpl) [W]	-	80
Yhteensä [W]	140	380

Taulukko 2. Eri jakelujärjestelmissä muuntajissa kuluvat kuormitushäviötehot

Jakelujärjestelmä	20/0,4 kV	Tasasähköjärjestelmä
Muuntajat 20/0,4 & 20/1 kV [W]	190	190
Tasasuuntaaja 50 kVA (2 kpl) [W]	-	206
Vaihtosuuntaaja 10 kVA (5 kpl) [W]	-	411
Yhteensä [W]	190	807

Taulukko 3. Eri jakelujärjestelmissä muuntajissa aiheutuvat tehohäviökustannukset tarkastelun pitoajalta.

Jakelujärjestelmät	20/0,4 kV	Tasasähköjärjestelmä
Tyhjäkäyntihäviöt [k€]	0,14	0,39
Kuormitushäviöt [k€]	0,2	0,83
Yhteensä [k€]	0,34	1,22