

# Tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikroverkoissa

Toni Kylkisalo & Raili Alanen

ISBN 978-951-38-6629-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2007

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026

Tekijä(t) Kylkisal, Toni & Alanen, Raili		
Nimeke <b>Tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikroverkoissa</b>		
Tiivistelmä Tämä tutkimus liittyy VTT:n DENSITY-ohjelman projektissa ”Energiavarastot hajautetun sähkönjakelun hallinnassa” (ENVADE+) tehtyyn tutkimustyöhön ja projektissa toteutettuun Toni Kylkisal on diplomityöhön. Tässä tutkimuksessa tehtiin teknis-taloudellinen tarkastelu tasajännitteen ja energiavarastoinnin hyödyntämisestä taajaman sähkönjakelussa. Tasajännite-jakelujärjestelmän toteutuksen mahdollistavia komponentteja ja ominaisuuksia tutkittiin etenkin järjestelmän ohjaustopologian kannalta. Työssä pohdittiin myös energiavarastojen roolia tasajännitejakelujärjestelmän osana ja tehokkaamman energian hallinnan työkaluna. Simulointitarkasteluja tehtiin kahdesta mikroverkosta. Simulointituloksista kävi ilmi, että tasajännitejakelujärjestelmällä voitaisiin toteuttaa katkeamaton sähkönsyöttö, joka myös tulevaisuudessa helpottaisi hajautetun tuotannon implementointia jakeluverkoihin. Lisäksi tutkittiin mahdollisen energiavarastoja ja hajautettua tuotantoa sisältävän tasajännitejakelujärjestelmän liiketoiminnallisia vaikutuksia energian hallintaan kuluttajan ja verkkoyhtiön näkökulmasta. Työssä kuvattiin hierarkkinen periaate, joka mahdollistaisi tehokkaan energian hallinnan ja hajautetun tuotannon tehokkaan vuorovaikutuksen sähkömarkkinoiden kanssa. Taloudellisessa tarkastelussa vertailtiin tasa- ja vaihtosähköjärjestelmän kustannuksia lähinnä yksinkertaistetussa 10 kV -keskijänniteverkossa. Vaikka pienjännitetasolla on aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu tasajännitejakelun tuovan selkeitä säästöjä, niin keskijännitetasolla vaihtosähköjärjestelmän havaittiin olevan investointikustannuksiltaan halvempi, mutta toisaalta tasajännitejärjestelmällä häviökustannukset jäivät jopa puoleen vaihtojännitejärjestelmän vastaavista.		
ISBN 978-951-38-6629-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinnumero 6698
Julkaisuaika Syyskuu 2007	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivu 135 s. + liitt. 2 s.
Projektin nimi Energiavarastot hajautetun sähkönjakelun hallinnassa	Toimeksiantaja(t) Tekes, VTT, ABB Oy, Eaton Power Quality Oy, Evox Rifa Group Oyj, Fortum Power and Heat Oy Generation, Merinova Oy Ab, Nokian Capacitors Oy, Helsingin Energia	
Avainsanat energy storage, DC-distribution, microgrid	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	





Series title, number and  
report code of publication

VTT Working Papers 78  
VTT-WORK-78

Author Kylkisal, Toni & Alanen, Raili		
Title <b>DC in Urban Areas Distribution Power Systems and Microgrids</b>		
Abstract This study deals with the utilization of DC distribution power systems and energy storages in urban areas. The properties and the components, that make the DC distribution power systems possible, are specifically examined from the perspective of the power system's control topology. The role of the energy storages as a part of the DC distribution power system and a tool of power quality control was also discussed. Using PSCAD/EMTDC simulation program two different concepts of the DC distribution power systems were simulated. Both low and medium voltage networks were designed as microgrids, which were capable operation without medium voltage feeder from the outside network as the entity of energy storages, auxiliary power source and loads. It emerged from the simulation that DC distribution power systems are capable to provide an uninterruptible delivery of current. In addition the effects on energy management of the DC distribution power systems, which include energy storages, were studied. Also a hierarchical principle was brought out, which could make an efficient interaction between electricity market and distributed power systems. Economical studies of the simplified 10 kV distribution system were done and the costs of AC and DC networks were compared. At 10 kV level AC system was found to be more economically efficient but DC network is more energy efficient because of remarkable smaller losses. Based on this study it can be said, that if the investment costs of the DC power systems can be reduced it could be a strong competitor to conventional AC power systems.		
ISBN 978-951-38-6629-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Project number 6698
Date September 2007	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 135 p. + app. 2 p.
Name of project Energy Storages in Distributed Power Systems	Commissioned by Tekes, VTT, ABB Oy, Eaton Power Quality Oy, Evox Rifa Group Oyj, Fortum Power and Heat Oy Generation, Merinova Oy Ab, Nokia Capacitors Oy, Helsingin Energia	
Keywords energy storage, DC-distribution, microgrid	Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

## Alkulause

Tämä tutkimustyö on toteutettu VTT:ssä Tekesin DENSY-ohjelmaan kuuluneessa projektissa ”Energiavarastot hajautetun sähköjakelun hallinnassa” (ENVADE+, 2006–2007). Projektin pääasiallinen rahoittaja on Tekes. Muita rahoittajia VTT:n lisäksi ovat ABB Oy, Eaton Power Quality Oy, Evox Rifa Group Oyj, Fortum Power and Heat Oy Generation, Merinova Oy Ab, Nokian Capacitors Oy ja Helsingin Energia.

Kiitämme hyvistä neuvoista ja ohjauksesta kaikkia tutkimustyöhön liittyviä henkilöitä ja projektin johtoryhmää (Ilkka Erkkilä, ABB Oy, Prosessiteollisuus, Kari Luoma, Merinova Oy Ab (puh.joht.), Yrjö Enqvist, Nokian Capacitors Oy, Jouko Niiranen ABB Oy, Drives, Juha Linden, Tekes, Kimmo Saarinen, Evox Rifa Group Oyj, Markku Hyvärinen, Helen Sähköverkko Oy, Ove Öhman, Eaton Power Quality Oy, Pentti Eronen, Fortum Power and Heat Oy Generation ja Raili Alanen, VTT (projektipäällikkö)).

Espoossa 22. toukokuuta 2007

Toni Kylkissalo ja Raili Alanen

# Sisällysluettelo

Alkulause.....	6
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	11
1. Johdanto .....	14
2. Taajama-alueiden nykyisen sähkönjakelun ominaispiirteet .....	16
2.1 Johdanto.....	16
2.2 Jakeluverkon nykytila.....	17
2.2.1 Yleistä .....	17
2.2.2 Maadoituskäytännöt .....	17
2.3 Standardit ja määräykset.....	18
2.3.1 Sähkömarkkinalaki.....	18
2.3.2 Standardit .....	18
2.4 Suunnittelu.....	19
2.4.1 Yleistä .....	19
2.4.2 Taajama-alueet .....	19
2.5 Vaihtojännitteen ominaisuudet.....	20
2.5.1 Verkostohäviöt .....	20
2.5.2 Jännitteenalenema .....	20
2.5.3 Yliaallot.....	22
2.5.4 Loisteho.....	24
2.6 Sähkön käytön ominaispiirteet .....	25
2.6.1 Kulutus .....	25
2.6.2 Kuormat taajamassa .....	26
2.7 Sähkön laadun hallinta .....	26
2.7.1 Keskeytykset .....	27
2.7.2 Jännitteen laatu.....	28
2.7.3 FRIENDS ja FACTS.....	29
2.8 Jakeluverkon kehityssuunta.....	31
2.8.1 Kustannusrakenne .....	31
2.8.2 Tekninen kehitys .....	31
2.8.3 Organisaatio ja omistus .....	33
2.8.4 Asiakkaiden intressit .....	34
2.9 Yhteenveto.....	34
3. Taajaman tasajännitejakeluverkon rakennemahdollisuudet .....	35
3.1 Johdanto.....	35
3.2 Jännitetasot ja maadoitus.....	37

3.3	DC-verkko kuluttajalla .....	39
3.3.1	Yleistä .....	39
3.3.2	Asuinkiinteistön DC-jakelu.....	40
3.3.3	ATK-keskusten DC-jakelu.....	42
3.4	Pienjännite-DC-jakeluverkko .....	42
3.5	Keskijännite-DC-jakeluverkko.....	44
3.6	DC-mikroverkko .....	45
3.6.1	Yleistä .....	45
3.6.2	Osa-alueisiin jakautuva DC-mikroverkko.....	46
3.6.3	Yksittäisen käyttäjän DC-mikroverkko.....	46
3.7	Yhteenveto.....	47
4.	Taajaman tasajännitejakeluverkon komponentit.....	48
4.1	Päämuuntaja .....	48
4.2	Suuntaajat .....	48
4.2.1	Yleistä .....	48
4.2.2	Tasasuuntaaja .....	49
4.2.3	Vaihtosuuntaaja.....	50
4.3	DC/DC-katkoja.....	50
4.4	Kondensaattorit, suodattimet .....	51
4.5	Kaapelit.....	52
4.6	Katkaisijat.....	53
4.7	Tuotantoyksiköt.....	56
5.	Tasajänniteverkon suojaus ja vianhallinta .....	57
5.1	Yleistä.....	57
5.2	Jännitteen laatu .....	57
5.3	DC-komponentin kulkeutuminen AC-verkkoon .....	59
5.4	Maasulku tasajänniteverkossa .....	59
5.4.1	Maasulku DC-puolella .....	59
5.4.2	Maasulku AC-puolella .....	60
5.5	Oikosulku tasajänniteverkossa .....	61
5.6	Virtamuuntajaratkaisut vikavirtojen mittauksessa .....	64
5.7	Kehittyneet suuntaajat vian hallinnassa.....	65
5.8	Agenttipohjainen vianhallintamenetelmä.....	66
6.	Tasajänniteverkon kuormanjako ja ohjaus.....	68
6.1	Yleistä.....	68
6.2	Kuormanjakoperiaate .....	69
6.3	Komponenttien mallinnus .....	70
6.4	Voltage Droop -ohjausmetodi .....	72
6.5	Average Current -ohjausmetodi .....	74



6.6	Master Slave -ohjausmetodi .....	75
6.7	Central Limit -ohjausmetodi.....	75
7.	Energian hallinta ja energiavarastot taajaman DC-jakeluverkon yhteydessä .....	77
7.1	Yleistä.....	77
7.2	Energiavarastot .....	78
7.2.1	Tyypit .....	78
7.2.2	Käyttö .....	79
7.2.3	Energiavarastojen käyttö DC-jakeluverkossa .....	80
7.3	Energian hallinta DC-jakeluverkossa .....	81
7.3.1	Yleistä .....	81
7.3.2	DC-jakeluverkkotason energian hallinta.....	82
7.3.3	Solmupistetason energian hallinta.....	83
7.3.4	Kuluttajatason energian hallinta.....	84
7.4	Tiedonsiirto .....	85
7.4.1	Yleistä .....	85
7.4.2	Liityntälaitteiston tiedonsiirto .....	86
7.4.3	Käyttöliittymät .....	88
8.	Liiketoimintamahdollisuudet .....	90
8.1	Yleistä.....	90
8.2	Toimijat .....	90
8.2.1	Palvelut ja tuotteet.....	92
8.2.2	Hajautetun tuotannon ja DC-jakelun aiheuttamat muutokset .....	94
9.	Case-tapauksien tarkastelu simuloiden .....	95
9.1	Johdanto.....	95
9.2	Konseptien määrittely.....	95
9.2.1	Case 1 – Energiavarastolla varmennettu pienjänniteasiakkaiden DC-verkko .....	95
9.2.2	Case 2 – Energiavarastolla ja varavoimalla varmennettu keskijänniteasiakkaiden DC-verkko.....	97
9.3	Simuloinnit ja tulokset.....	99
9.3.1	Case 1 – Energiavarastoilla varmennettu pienjänniteasiakkaiden DC-verkko .....	99
9.3.2	Case 2 – Energiavarastoilla ja varavoimalla varmennettu keskijänniteasiakkaiden DC-verkko.....	105
9.4	Simuloinnin yhteenveto.....	108
10.	Kustannustarkastelut .....	109
10.1	Vaihtojänniteverkon kustannustekijät .....	109
10.1.1	Muuntajien kustannukset .....	109

10.1.2	Kaapeleiden kustannukset.....	110
10.1.3	Häviökustannukset.....	111
10.1.4	Keskeytyskustannukset.....	112
10.2	Tasajänniteverkon kustannustekijät.....	113
10.2.1	Kaapelien kustannukset.....	113
10.2.2	Suuntaajien kustannukset.....	114
10.2.3	Häviökustannukset.....	114
10.3	AC- ja DC-keskijännitejakeluverkkojen kustannusvertailu.....	115
10.3.1	Johdanto.....	115
10.3.2	Vertailtavien järjestelmien kuvaus.....	116
10.3.3	Kustannusvertailun tulokset.....	118
11.	Yhteenveto.....	122
11.1	Nykyinen sähkönjakelu taajamassa.....	122
11.2	DC-jakelu, energiavarastointi ja mikroverkko.....	122
11.3	DC-verkko suomalaisen taajaman jakeluverkkona.....	123
11.4	Hyödyt ja SWOT-analyysi.....	124
11.5	Kannattavuus.....	125
11.6	Jatkokehitys ja tulevaisuuden näkymät.....	125
	Lähdeluettelo.....	127
	Liite A: Standardin SFS-EN 50160 määrittelemät sähkön laatuksiteerit	

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

$a_0$	Fourier-kerroin
AC	Alternated Current, vaihtovirta
$A_{läm}$	rakennuksen lämmitettävä pinta-ala
$a_n$	Fourier-kerroin
APF	Active Power Filter, aktiivisuodin
BES	Battery Supply, akku
$b_n$	Fourier-kerroin
$C_{DC,suuntaaja}$	suuntaajan kondensaattori
$C_{maadoitus}$	maadoituskondensaattori
$C_{suojaus}$	maadoituskondensaattori
DC	Direct Current, tasavirta
DG	Distributed Generation, hajautettu tuotanto
DSC	Dynamic Series Capacitor, sarjakompensaattori
DSM	Demand Side Management, kysynnän hallinta
DVR	Dynamic Voltage Restorer, Dynaaminen jännitteensäätäjä
ECN	Energy Research Center of Netherlands, Alankomaiden energia-alan tutkimuskeskus
$E_{DC}$	DC-verkon jännite
EEC	European Economic Community, EY, Euroopan yhteisö
$E_{N,suuntaaja}$	suuntaajan nimellisjännite DC-puolella
$E_{off}$	poiskytkennän energiahäviö
$E_{on}$	päällekytkennän energiahäviö
$E_{rr}$	estosuunnan energiahäviö
EU	Euroopan unioni
FACTS	Flexible AC Transmission System
FRIENDS	Flexible, Reliable and Intelligent Energy Delivery System
$f_{sw}$	suuntaajan puolihohteiden kytkentätaajuus
GE	General Electric
GPRS	General Packer Radio Service, pakettikytkentäinen tiedonsiirtopalvelu
HVDC	High Voltage Direct Current
I	sähkövirta
<b>I</b>	virtamatriisi
$I_{dc0}$	approksimoimaton oikosulkuvirta
$I_{dc1}$	approksimoitu oikosulkuvirta
$I_{dcan}$	negatiivisen navan mittamuuntajan virta
$I_{dcap}$	positiivisen navan mittamuuntajan virta
$I_{dcbn}$	negatiivisen navan mittamuuntajan virta
$I_{dcbp}$	positiivisen navan mittamuuntajan virta
$I_{dcdiff1}$	differentiaalisen mittamuuntajan virta
$I_{dcdiff2}$	differentiaalisen mittamuuntajan virta
IGBT	Insulated Gate Bibolar Thyristor
$I_L$	kuormitusvirta

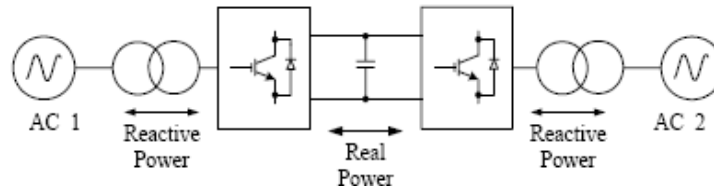
$I_{max}$	suurin yksittäiselle suuntaajalle sallittu virta
$I_N$	verkon nimellisvirta
$I_{nom}$	nimellisvirta
IP	Internet Protocol, verkkokerroksen protokolla
IPv4	verkkokerrosprotokollan versio 4
IPv6	verkkokerrosprotokollan versio 6
$I_R$	referenssivirta
$I_{rms}$	kuormitusvirta
$I_v$	vaihevirta
$I_{vika}$	vikavirta
$I_{vika/2}$	haarautunut vikavirta
K	ohjauksen vahvistus
KAH	keskeytyksen aiheuttama haitta
$K_{skaalaus}$	skaalauskerroin oikosulkuvirtojen laskemiseen
Li	litium
LVD	Low Voltage Directive, pienjännitedirektiivi
$L_{vika}$	vikainduktanssi
N	solmupisteiden kokonaismäärä
n	solmupisteiden lukumäärä
NYSEG	New York State Electric & Gas Corporation
$P_{cond}$	suuntaajan johtohäviöt
PFCC	Power Factor Correction Capacitor, tehokerrointa korjaava kondensaattori
$P_h(t)$	johtimen kuormitushäviöt ajan hetkellä t
$P_{h,max}$	johtimen kuormitushäviöiden huipputeho
$P_{kh}$	kuormitushäviö
$P_k$	solmupisteen k teho
$P_{kN}$	muuntajan nimelliskuormitushäviö
$P_{kuorma}$	kuorman teho
$P_{max,kk}$	maksimi pätöteho kuukaudessa
$P_n$	suuntaajan nimellisteho
PSCAD	Power System CAD -simulointiohjelmisto
$P_{sw}$	suuntaajan kytkentähäviöt
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
$Q_{max,kk}$	maksimi loisteho kuukaudessa
R	resistanssi
$R_k$	kaapelin resistanssi
$r_{on}$	johtavantilan resistanssi
$R_{sis}$	kondensaattorin sisäinen resistanssi
$R_{vika}$	vikaresistanssi
S	muuntajan kuormitus
SA	Surge Arrester, ylijännitesuoja
SETC	Static Electric Tap Changer, staattinen sähköinen käämikytkin
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage, suprajohtava magneettisen energian varasto

$S_N$	nimellisteho
SSCB	Solid-State Circuit Breaker, elektroninen katkaisija
SSTS	Solid-State Transfer Switch, elektroninen vaihtokytkin
STATCOM	Static Synchronous Compensator, staattinen tahtikompensaattori
SVC	Static Var Compensator, staattinen loistehon kompensaattori
SWOT	Strengths Weaknesses Opportunities Threats, nelikenttämenetelmä
TF	Tuned Filter, aktiivisuodin
$t_h$	häviöiden käyttöaika
THD	Total Harmonic Distortion, kokonaissärökerroin
TSC	Thyristor Switched Capacitor, tyristorikytketty kompensaattori
$U'_{hpää}$	kolmivaihelähdön jännitteenalenema
$U_2$	johdon loppupään jännite
$U_{DC}$	tasajänniteverkon nimellisjännite
$U_h$	jännitteenalenema
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön tehonsyöttö
$U_{pää}$	pääjännite
$\mathbf{V}$	jännitematriisi
$V_{DC,ref}$	referenssijännite
VSC	voltage source converter, jänniteohjattu konvertteri
$W_h$	johtimen häviöenergia
$V_k$	solmupisteen $k$ jännite
$V_{maa}$	maan potentiaali
$V_n$	solmupisteen $n$ jännite
$V_{on}$	johtavan tilan jännitehäviö
VPN	Virtual Privat Network, näennäinen yksityinen verkko
$V_{ulos}$	suuntaajan ulostulojännite
$X$	reaktanssi
XHTML	www-sivujen merkintäkieli
$\mathbf{Y}$	admittanssimatriisi
$Y_{kk}$	solmupisteeseen $k$ liittyvien admittanssien summa
$Y_{kn}$	solmupisteiden $k$ ja $n$ välinen admittanssi
$Z_{droop}$	ohjauksen ekvivalenttinen virtuaalinen impedanssi
$Z_{r0}$	skaalaamaton suuntajaan ekvivalentti impedanssi
$Z_{r1}$	skaalattu suuntajaan ekvivalentti impedanssi
$Z_{ulkoinen}$	DC-verkon ulkoinen ekvivalentti impedanssi
$\beta$	jännitekerroin
$\delta_n$	suuntaajan suhteellinen jännitteenalenema nimelliskuormalla
$\xi_n$	vaimennuskerroin
$\omega$	kulmataajuus

# 1. Johdanto

Tasajännitteen käyttämistä sähköenergian siirtämiseen perinteisen vaihtojännitteen sijasta on alettu tutkia viime aikoina aktiivisesti. Mikään uusi keksintö se ei kuitenkaan ole. Tasajännitejakelua käytettiin jo 1800-luvulla teollisuudessa ennen vaihtosähköön siirtymistä. Myös taajamissa käytettiin tasajännitejakelua ja esim. osassa Helsinkiä 110 VDC -jakelu säilyi 1950-luvulle saakka.

Kiinnostuksen heräämistä tasajänniteverkkoja kohtaan on vauhdittanut sähköverkkojen siirtokapasiteettitarpeen kasvu sekä tasajänniteverkkoliittynän perinteisiin vaihtosähköjärjestelmiin mahdollistavan tehoelektronikan kehitys. Pitkille yksinkertaisille siirtolinjoille lähinnä suurjännitteisiin (High Voltage Direct Current, HVDC) merenalaisiin yhteyksiin onkin jo vuosia sovellettu tasajännitetekniikkaa, jolloin on saatu enemmän siirtokapasiteettia käyttöön suhteessa vaihtosähköön. HVDC- tekniikan etuja on myös parempi tehon hallinta, pienemmät häviöt ja edullisemmat kustannukset AC-järjestelmään nähden. Vuonna 1997 asennettiin Ruotsiin (Hellsjön–Grängesbergin välinen yhteys) ensimmäinen jännitelähdekonverttereilla toteutettu tasasähköyhteys (ABB: HVDC Light® -järjestelmä), jossa käytetään IGBT-transistoreja (Kuva 1-1). Tässä 3 MW:n järjestelmässä käyttöjännite on  $\pm 10$  kV ja etäisyys 10 km. Myöhemmin näitä järjestelmiä on asennettu lukuisia ympäri maailmaa [1].



Kuva 1-1. VSC-perusteinen HVDC-järjestelmä, jossa on käytetty IGBT-tekniikkaa [1].

Nyt tutkimuksen kohteeksi on muodostumassa tasajännitteen soveltaminen myös taajama- ja kaupunkijakeluverkkoihin. Tavoitteena on tasajänniteverkkoja ja energiavarastoja hyödyntämällä lisätä sähkön laatua ja jakelun luotettavuutta taajamassa. Lisäksi siirtohäviöistä ja -kaapeleista aiheutuvat kustannukset voisivat laskea olennaisesti nykyiseen verrattuna. Kiinnostus tasajännitteen käytön tutkimukseen johtuu myös siitä, että hajautetun energiantuotannon integrointi nykyisen kaltaiseen jakeluverkkoon voisi olla ongelmallinen. Monet tulevaisuuden hajautetun energian tuotannon ratkaisuksista tuottavat suoraan tasajännitettä, kuten polttokennot ja aurinkoenergiajärjestelmät. Myös vaihtelevaa tehoa tuottava tuulivoimalaitos voisi liittyä tehoelektronikan avulla kustannustehokkaammin suoraan tasajänniteverkkoon. Tasajännitejärjestelmät antavat myös mahdollisuuden mikroverkon (autonomiseen toimintaan pystyvän verkon osuuden) tehokkaaseen toteuttamiseen ja mahdollistavat tasajännitteellä toimivien energiavarastojen, kuten erityyppisten akkujen, tehokkaamman hyödyntämisen.

Tasajännitteen käyttöönotto sähkönsiirrossa voisi luoda monenlaisia hyötynäkökulmia perinteiseen vaihtojännitteellä toteutettuun sähkönsiirtoon verrattuna. Etenkin jakelujärjestelmän soveltuvuus hajautetun energiatuotannon tarpeisiin on tutkimuksen kohteena. DC-jännitteen luonteesta johtuen eri osajärjestelmien yhteensovittaminen olisi teknisesti helpompaa. Tässä työssä tasajänniteverkosta käytetään myös nimityksiä DC-verkko, DC-jakeluverkko ja DC-järjestelmä sekä DC-mikroverkko, joka on autonomiseen toimintaan pystyvä jakeluverkon osa.

Koska tasajänniteverkkojen käyttö taajaman sähköjakeluun on vielä kokeilu- ja suunnitteluasteella, ei ole muodostunut mitään standardia tai yleistä käsitystä siitä, kuinka suuri esim. jakelujännitteen tulisi olla. Suomen Standardoimisliiton standardi SFS-EN-50160 luokittelee maksimiksi pienjakelutasajännitteeksi 1500 V. Suurin mahdollinen jännite mahdollistaisi suuremmat tehot yksittäisillä jakelulinjoilla, mutta olisi myös varteenotettava turvallisuusriski.

Tämän työ perustuu pääosin Toni Kylkisaloon diplomyöhön [2], jossa tutkitaan sähköjakelun toteutusta tasajännitejärjestelmänä, jossa rajapinta vaihtojännitteen kanssa olisi lähinnä nykyisten 20 kV/0,4 kV -jakelumuuntamoiden paikoilla. Hajautetun energiantuotannon tehon ollessa liian suuri pienjänniteverkolle voidaan harkita tasajännitteen soveltamista myös osittain keskijänniteverkkoon. Tätä käsitellään myöhemmin lisää kohdassa 7.

## 2. Taajama-alueiden nykyisen sähköjakelun ominaispiirteet

### 2.1 Johdanto

Tässä luvussa käsitellään sähköjakelun ominaispiirteitä taajama- ja ydinkaupunkialueilla sekä tekijöitä, jotka vaikuttavat sähköjakelun nykyiseen tilaan. Luvussa tuodaan esille sähköjakeluverkon muoto ja nykytila, ja käydään läpi jakeluverkon suunnittelua koskevat standardit ja määräykset. Lisäksi käsitellään nykyisen vaihtojännitteen suomia etuja ja ongelmia. Lopuksi pohditaan sähkön käytön ominaispiirteitä ja sitä, millä tavoin nykyistä järjestelmää tulisi kehittää paremman sähkön laadun hallinnan takaamiseksi.

Luvun tarkoituksena on luoda pohjaa ja vertailunäkökohtia DC-jakeluverkon tarkastelun helpottamiseksi. Tuomalla esiin nykyisen kaltaisen AC-jakeluverkon ominaisuuksia ja ongelmia on helpompi käsittää DC-jakelun tarjoamia etuja energian ja sähkön laadun hallinnassa. DC-jakeluverkko antaa sähköyhtiöille mahdollisuuden entistä paremmin tarjota joustavampia ratkaisuja ja palveluita asiakkaille.

Siinä missä hajautetut energijärjestelmät asettavat muutospaineita sähkömarkkinalain uusimiselle, voidaan DC-jakeluverkon käsittää myös vaativan oman DC-jakeluverkko-standardinsa. Jotkin tässä luvussa läpikäytävät sähkön laadulliset perusongelmat nykyisessä AC-jakeluverkossa eivät esiinny DC-jakeluverkon yhteydessä ollenkaan. Toisaalta DC-verkon yhteydessä on erityisongelmia, kuten oikosulkuvirran mittaamiseen sekä katkaisuun liittyvät ongelmat. DC-jakeluverkon ominaisuuksia käsitellään tarkemmin luvussa 3. Etenkin hajautettujen energijärjestelmien yhteydessä DC-jakeluverkkojen edut tulevat esiin. Kuormanjaon ohjauksen toteuttaminen sekä energiavarastojen liittäminen jakeluverkkoon on huomattavasti yksinkertaisempaa. DC-jakeluverkon avulla on siis mahdollista parantaa sekä sähkön laatua, että luoda paremmat toteutusmahdollisuudet tulevaisuudessa yleistyvälle hajautetulle tuotannolle.

Luvussa 2.7 on mainittu, että käyttökeskeytyksien ja jännitelaadullisten ongelmien poistamiseen ei ole järkevää investoida liikaa, kun käytössä on nykyisen kaltainen AC-jakelujärjestelmä. DC-jakeluverkolla on kuitenkin mahdollista toteuttaa lähes katkeamaton sähkön syöttö loppukäyttäjille käyttäen apuna DC-verkkoon kytkettävää hajautettua energiatuotantoa ja -varastoja. Myös DC-järjestelmässä voidaan suunniteltujen huoltokeskeytysten vaikutusalueita pienentää olennaisesti käytettäessä rengasverkkoa, jossa muun verkon toiminta voi jatkua, vaikka jokin kaapelisegmenteistä olisikin pois käytöstä.

Siirryttäessä tulevaisuudessa yhä voimakkaammin hajautettuun energiatuotantoon se aiheuttaa myös muutospaineita sähköyhtiöiden organisaatorakenteisiin. Jo nyt viime vuosina on ollut havaittavissa voimakasta palveluiden ulkoistamista. Ulkoistaminen



tulee varmasti lisääntymään, kun hajautettujen energiajärjestelmien yleistyminen vaatii paljon lisäresursseja. Toiminnan laajentuessa myös sähköyhtiöiden riskit kasvavat. Ulkoistamisella voidaan pienentää riskejä, koska nopeasti muuttuvissa tilanteissa lisäresursseihin ei tarvitse välttämättä sitoutua pitkäksi aikaa. Samalla siirtyminen hajautettujen energiajärjestelmien aktiiviseen energian hallintaan luo kysynnän uusille toimijoille.

Luvussa 2 pyritään luomaan kuva tämän hetken tilanteesta ja tulevaisuuden energiajärjestelmien vaatimuksista. Tämän luvun pohjalta on myös helpompi DC-jakeluverkon eri hyötynäkökohtia, sekä teknilliseltä, että taloudelliselta kannalta.

## **2.2 Jakeluverkon nykytila**

### **2.2.1 Yleistä**

Suomessa kolmivaiheisen jakelujärjestelmän jännitteinä käytetään pääasiallisesti alueverkoissa 110 kV tai 45 kV, keskijänniteverkoissa 20 kV sekä pienjänniteverkoissa 0,4 kV vaihejohtimien välillä. Maailmanlaajuisesti jakelujännitteet voivat vaihdella melkoisesti eri mannerten välillä, esimerkiksi Isossa-Britanniassa käytetään taajama- ja kaupunkiverkoissa jännitteinä 6,6 kV tai 11 kV, sekä haja-asutusalueilla keskijänniteverkoissa ovat käytössä jännitteet 11 kV ja 33 kV. Kun jakeluverkkoja käytetään säteittäisinä, ovat oikosulkuvirrat pienempiä sekä jännitteensäätö, vikojen rajaus ja suojauksen toteutus ovat helpompia toteuttaa. Pienjänniteverkot rakennetaan tyypillisesti säteittäisiksi ja keskijänniteverkot silmukoiksi, jolloin vikojen sattuessa eri alueiden eristäminen erottimien avulla mahdollistaa huoltotyöt ja aiheutuneen käyttökeskeytyksen vaikutukset saadaan minimoitua. [3]

### **2.2.2 Maadoituskäytännöt**

Jakeluverkon maadoittamistapoja on hyvin paljon erilaisia ja siihen läheisesti liittyviä muutoksia itse verkon rakenteessa. Suomessa pääasiallisesti pienjänniteverkko on maadoitettu tähtipisteestä, mutta keskijänniteverkkoa käytetään joko maasta erotettuna tai sammutettuna, jolloin maakapasitanssit on kompensoitu tähtipisteeseen kytketyllä inductanssilla.

Yhdysvalloissa on käytössä erillinen nollajohdin, jolloin muuntajat ovat yksivaiheisia ja ne on kytketty vaiheen ja nollajohtimen välille. Isossa-Britanniassa on käytössä Suomen kaltainen järjestelmä, mutta tähtipiste on usein maadoitettu resistanssin kautta. Erikoisuutena Ison-Britannian pienjännitejakeluverkoissa on se, että pientaloalueita syötetään yhteisellä suuren poikkipinnan omaavalla kolmivaihejohdolla, josta yksittäisiä taloja syötetään suoran liittymän kautta pienen poikkipinnan yksivaihejohdoilla. [3]

## 2.3 Standardit ja määräykset

### 2.3.1 Sähkömarkkinalaki

Suomessa sähköverkkoliiketoiminta on luvanvaraista ja sitä koskevat lait ja määräykset on kirjattu Sähkömarkkinalakiin 386/1995 ja Sähköturvallisuuslakiin 410/96. Sähköverkkoluvan omaavalla sähköyhtiöllä on velvollisuus kehittää sähköverkkoa, sen toimintaa, yhteyksiä muihin verkkoihin ja toimittaa hyvänlaatuista sähköä kuluttajille kohtuullisin kustannuksin. Laissa on myös määrätty asetus sähkönsiirtovelvoitteesta, joka velvoittaa myymään sähkönsiirtopalveluja kohtuullista korvausta vastaan. Lisäksi sähköyhtiön verkkoliiketoimintaa ja sen mahdollisesti omistamaa sähköverkkoa kuvaavat lukuarvot tulee ilmoittaa julkisesti Energiamarkkinavirastolle, joka valvoo tällä tavoin sähköyhtiöiden johdonmukaisuutta kohtuullisuusvelvoitteiden täyttämässä. [4]

Lain tarkoituksena on varmistaa kuluttajille turvallisen kohtuuhintaisen ja hyvälaatuisen sähköenergian saanti, sekä mahdollistaa vapaiden sähkömarkkinoiden oikeellinen toiminta.

### 2.3.2 Standardit

Sähkön jakeluverkkoa ja sen suunnittelua ohjaavia standardeja on lukuisia. Ryhmä 29.240 koskee sähkönjakeluverkkoja ja 91.140.50 sähkönjakelujärjestelmiä, joissa esim. SFS 6000 koskee pienjänniteasennuksia, SFS 6001 suurjännitesähköasennuksia ja SFS 6002 sähkötyöturvallisuutta. Tarkasteltaessa sähkön laadun parantamiseen liittyviä menetelmiä ja ratkaisuja voidaan olennaisimpana pitää standardia SFS-EN 50160 ”Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet”, jossa määritellään raja-arvot sähkön laatua kuvaaville suureille.

Yleisimpiä sähköverkossa esiintyviä häiriöilmiöitä:

- harmoniset yliaaltovirrat ja -jännitteet
- jännitekuopat ja välkyntä (flicker)
- ylijännitteet
- transientit
- jännitteen epäsymmetria
- taajuuden muutokset
- tasajännitekomponentti.

Standardissa on näitä ilmiöitä kuvaaville suureille määritelty reunaehdot, jotka kunkin asiakkaan liityntäkohdan tulee täyttää (Liite A). Näin saadaan taattua sähköjakeluverkkojen laadun tasaisuus ja laitteiden yhteensopivuus valtakunnallisesti. Tämä ohjaa verkko-yhtiöitä suunnittelemaan järjestelmät niiden mukaisesti.

Suojautuminen häiriöiltä aiheuttaa suuria lisäkustannuksia verkkoyhtiöille. Kannattavampaa verkkoyhtiön kannalta on kuitenkin toimittaa sähköä kuin olla myymättä. Menetettyjen myyntitulojen, keskeytyksen aiheuttaman haitan (KAH) ja vakiokorvauksen määrä on huomattavan suuri verrattuna sähkön laadun hallinnan vaatimiin investointeihin. Tästä syystä verkkoyhtiöiden sallitun tuoton sitominen KAH-arvoihin tulevaisuudessa mahdollistaisi luonnollisten monopolien kannustavan säätelyn. Jakeluverkkojen kehittämällä ja vaihtoehtoisten ratkaisumallien tutkimisella voitaisiin löytää kustannustehokkaampia tapoja toteuttaa tulevaisuuden jakeluverkkoja. [5]

## **2.4 Suunnittelu**

### **2.4.1 Yleistä**

Sähkönjakeluverkon suunnittelulla pyritään täyttämään edellisessä kohdassa 2.3 mainittujen standardien vaatimukset. Jakeluverkon suunnittelu lähtee pääasiallisesti liikkeelle tekemällä tuleville järjestelmille aluevaraukset jo vuosia ennen varsinaista rakentamista. Suunnittelulla on jakeluverkon toiminnan ja kustannusten kannalta erittäin suuri rooli. Vaikka siirryttäisiin vaihtojännitteestä tasajännitteeseen taajaman jakeluverkoissa, olisi suunnittelussa kuitenkin otettava huomioon samat näkökohdat. Maastosuunnittelu varmasti yksinkertaistuisi kapeampien johtokatujuen vuoksi, mutta järjestelmien monimutkaisuus ja tehoelektroniikan tarpeen kasvu vaatisi huomattavasti lisää etenkin kohdesuunnittelua. Suunnittelun eri vaiheet ovat:

- kehittämissuunnittelu
- kohdesuunnittelu
- maastosuunnittelu
- rakennesuunnittelu
- työsuunnittelu.

### **2.4.2 Taajama-alueet**

Taajama-alueiden jakeluverkko on pääasiassa maakaapeliverkkoa. Maakaapeleiden käytöllä voidaan luonnollisesti välttää sääoloista aiheutuvia keskeytyksiä. Toisaalta maakaapelointia käytetään taajama-alueilla lähinnä ympäristöllisistä syistä. Maakaapeleilla on kuitenkin suhteessa pienempi kuormitettavuus kuin saman poikkipinta-alan omaavilla avojohdoilla. Koska taajamien tehotiheys on maaseutua suurempi, ovat kaapelien tarvittavat poikkipinnat myös suurempia.

Kun yhden lähdön takana on suuri määrä asiakkaita, voivat kyseisen lähdön keskeytyskustannukset nousta erittäin suuriksi. Siksi taajama-alueilla verkot suunnitellaan usein renkaiksi, koska vikaantuneen maakaapeliyhteyden korjaaminen kestää huomattavasti pitempään kuin avojohdolla. Rengasmaisen rakenteen ansiosta varasyötön käyttöönotto on nopeaa, ja keskeytyskustannukset pysyvät kohtuullisina. Maakaapeleiden käyttö on rajoittunut pääasiassa kaupunkeihin, joissa kaapelipituudet ovat pienempiä, sillä maakaapelien investointikustannukset keskijännitteellä ovat suuret verrattuna avojohtoon. Pienjännitejakeluverkoissa avojohdon ja maakaapelin investointikustannukset ovat kuitenkin samaa luokkaa. [3]

## **2.5 Vaihtojännitteen ominaisuudet**

### **2.5.1 Verkostohäviöt**

Sähköenergian siirtämistä loppukäyttäjille kolmivaiheisen vaihtojännitejakeluverkon avulla voidaan pitää teknistaloudellisesti hyvänä ratkaisuna. Suomessa on tällä tekniikalle toteutettuja keskijännitejohtoja noin 140 000 km, josta maakaapeleita on 13 000 km. Vastaavasti pienjänniteverkkoa on noin 230 000 km, josta maakaapeleita on 70 000 km. [9], [64]

Vuonna 2005 verkostohäviöt olivat 3 TWh kokonaiskulutuksen ollessa sinä vuonna noin 85 TWh. Kansainvälisesti katsoen Suomen sähköverkko on tekniseltä toteutukseltaan aivan maailman kärkiluokkaa. Vuodesta 2005 laskettu keskimääräinen verkostohäviö 3,5 % on erittäin pieni. Esimerkiksi Yhdysvalloissa vastaava verkostohäviö on noin 6 %:n luokkaa. Verrattaessa tuloksia täytyy ottaa huomioon valtioiden kokosuhteet. Joissakin maissa häviöt voivat nousta kohtuuttomiksi, kuten esimerkiksi Intiassa, jossa häviöt vaihtelevat 18 %:sta jopa 62 %:iin riippuen maakunnasta. [10], [11]

Häviöt muodostuvat pääasiassa muuntajissa ja siirtojohdoissa. Muuntajien osuus häviöistä on yleensä noin yksi kolmannes.

### **2.5.2 Jännitteenalenema**

Vaikka nykyinen jakeluverkko perustuu täysin kolmivaihejärjestelmään, se ei ole täysin ongelmavapaa ratkaisu, koska sillä on monia siirtokapasiteettia rajoittavia tekijöitä. Etenkin suurilla etäisyyksillä muodostuu ongelmaksi liian suuri jännitteenalenema. Tämä lisää joko muuntajien, loisivirran kompensoinnin tai suurempipoikkipintaisten johtimien tarvetta, joka nostaa kustannuksia merkittävästi.

Jännitteenalenema  $U_h$  muodostuu jakeluverkon siirtojohdon impedansseissa syntyvästä jännitehäviöstä. Se voidaan laskea johdon alku- ja loppupään jännitevektorien itseisarvojen erotuksena yhtälön (1) avulla. Tämä on kuitenkin usein vaikeaa, koska loppupään jännitettä ei vielä laskennan alussa tiedetä. [7]

$$U_h = |U_{1v}| - |U_{2v}| \quad (1)$$

$U_{1v}$  on johdon alkupään jännitevektorin itseisarvo

$U_{2v}$  on johdon alkupään jännitevektorin itseisarvo.

Siirtoetäisyyden ollessa avojohdoilla alle 100 km ja maakaapeleilla alle 20 km voidaan jännitteenaleneman laskemiseen käyttää likiarvokaavaa (2), jolloin välttyään monimutkaiselta vektorilaskennalta. Kaava antaa jännitteenaleneman vaihejännitteenä, joka pitää ottaa huomioon laskettaessa prosentuaalista jännitteenalenemaa. [8]

$$U'_h = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi \quad (2)$$

$I$  on kuormavirta (vaihe)

$R$  on johtimen kokonaisresistanssi

$X$  on johtimen kokonaisreaktanssi

$\varphi$  on vaihejännitteen ja -virran välinen vaihekulma.

Kuormavirran  $I$  laskemiseen pitäisi käyttää johdon loppupään jännitettä  $U_2$ .

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi} \quad (3)$$

Kun yhtälö (3) sijoitetaan yhtälöön (2), niin saadaan siirtojohdon jännitteenalenemalle seuraavanlainen kaava, jossa kuormitusvirtaa ei tarvitse tietää lainkaan.

$$U'_{h,pää} = \frac{P_{kuorma}}{U_{pää}} (R + X \cdot \tan \varphi) \quad (4)$$

$P_{kuorma}$  on johtolähdön kuormituspäätöteho

$U_{pää}$  on kolmivaihelähdön pääjännite

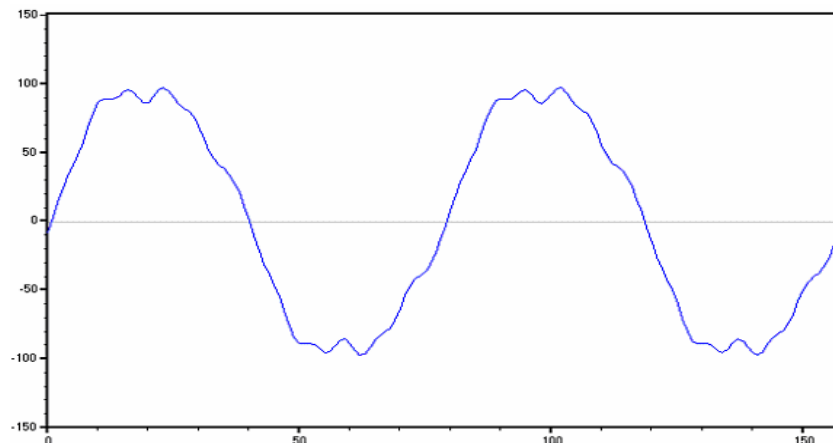
$U'_{h,pää}$  on kolmivaihelähdön jännitteenalenema (pääjännite).

Siirtoetäisyyden kasvaessa merkittävästi tulee laskennan perustana käyttää yleistä siirtojohtoteoriaa.

### 2.5.3 Yliaallot

Jakeluverkossa esiintyvät yliaallot voidaan jakaa kahteen ryhmään, harmonisiin ja epäharmonisiin. Yliaallot ovat jännitteen perustaajuuden monikertoja, ja erilaiset epälineaariset kuormat muodostavat niitä verkkoon. Epälineaaristen kuormien ottama virta ei ole sinimuotoista, vaan voi poiketa siitä erittäin paljon.

Jos verkko on heikko ja sen impedanssi on suuri, yliaaltovirran reagoidessa verkon impedanssin kanssa muodostuu jännitteeseen epäsymmetriaa, jota kutsutaan jännitesäröksi (THD Total Harmonic Distortion). Tämä aiheuttaa ylimääräisiä häviöitä verkon komponenteissa ja voi myös häiritä herkkien laitteiden toimintaa. Yleisimpiä aiheuttajia ovat tehoelektronikan laitteet, kuten taajuusmuuttajat, UPSit, tietokoneet, hakkuriteholähteet ja loisteputkilamput. Myös raudan kyllästymisen muuntajissa ja pyörivissä koneissa saa aikaan yliaaltojen muodostumista jännitteeseen. Pyörivissä koneissa yliaaltoja tulee myös käämityksestä.



Kuva 2-1. Jännite, jossa on mukana 5.-, 7.-, 11.- ja 13.-harmoniset yliaallot. [13]

Säröytyneen jännitteen käyrämuotoa voidaan tarkastella matemaattisesti siten, että siirytään tarkastelemaan signaalia taajuustasossa aikatason sijaan. Tällöin voidaan signaali jakaa eri taajuuskomponentteihin Fourier-analyysin avulla. Sen mukaan jokainen jaksollinen funktio voidaan esittää äärettömän monen eritaajuisen sinifunktion summana yhtälön (5) mukaisesti. [14]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (5)$$

$f(t)$  on signaalia kuvaava integroitava funktio.

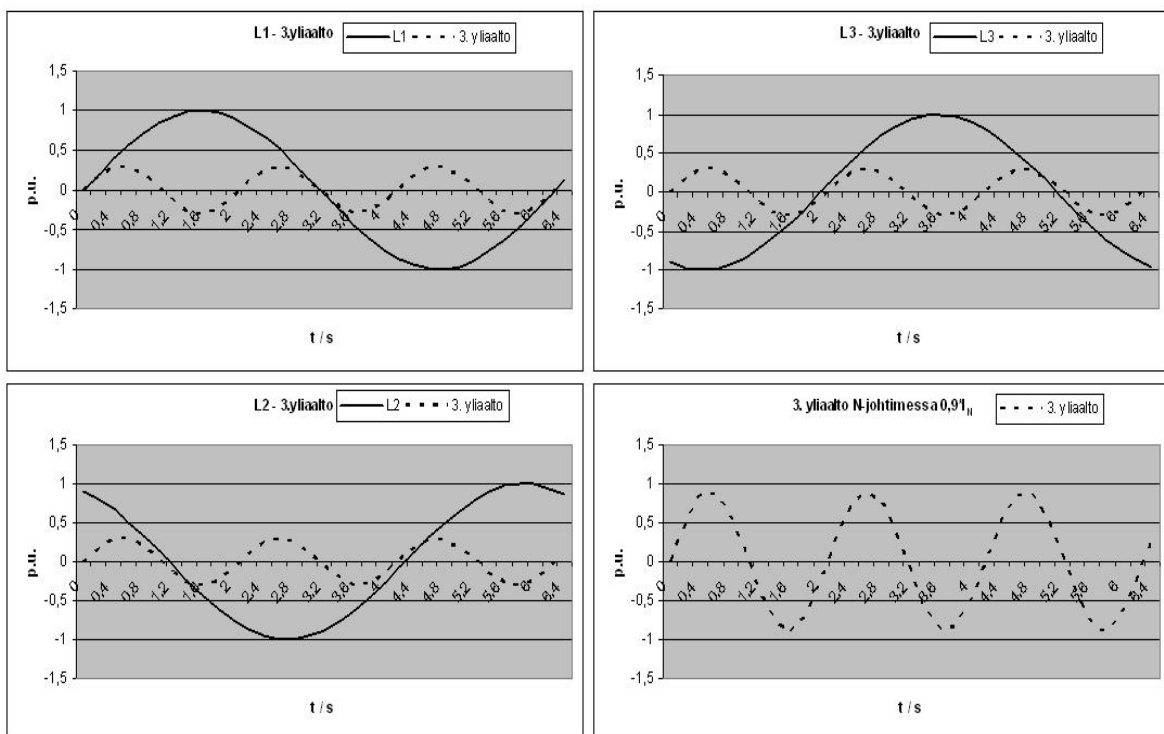
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (6)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (8)$$

$a_0$ ,  $a_n$  ja  $b_n$  ovat eri taajuuksille määritellyt Fourier'n kertoimet.

Erityisen ongelmallisia kolmivaihejärjestelmän kannalta ovat 3. kertaluvun harmoniset yliaallot. Niiden taipumuksena on summautua verkon nollajohtimeen, josta aiheutuu erittäin paljon lisähäviöitä. Summautuminen johtuu siitä, että yliaallot ovat samanvaiheiset joka vaiheessa, jolloin ne eivät kumoa toisiaan tähtipisteessä. Nykyisen kaltaisten valaisinjärjestelmien yhteydessä voi yliaaltojen osuus vaihejohtimissa olla jopa 30 % kuormitusvirrasta. 3. yliaallon summautuessa nollajohtimeen on nolla-johtimessa kulkeva virta tällöin 90 % kuormitusvirrasta. Kuva 2-2 havainnollistaa perusaallon ja 3. yliaallon esiintymistä vaihejohtimissa, sekä 3. yliaallon summautumista nollajohtimeen. [12]



Kuva 2-2. Harmonisen 3. yliaaltovirran summautuminen nollajohtimeen vaihevirroista.

## 2.5.4 Loisteho

Jakeluverkossa esiintyy paljon erilaisia kuormia, jotka tuottavat joko induktiivista tai kapasitiivista loistehoa. Etenkin moottorit, muuntajat ja loisteputkilamput tarvitsevat loistehoa toimiakseen. Usein ajatellaan, että laitteet, jotka tuottavat induktiivista loistehoa, itse asiassa kuluttavat kapasitiivista loistehoa, jota tuotetaan kondensaattoreilla tai ylimagnetoimalla tahtigeneraattoreita.

Jakeluverkossa loisteholla ei ole yhtä suurta merkitystä kuin siirtoverkossa, mutta se on kuitenkin otettava huomioon. Etenkin pitkillä johto-osuuksilla ja suurien induktiivisten kuormien sijaitessa johtolähtöjen päissä on kompensointi mielekäästä. Liiallinen loisteho kuormittaa johtoja ja aiheuttaa lisähäviötä, koska se nostaa siirtojohdoissa kulkevaa virtaa ja näin ollen päätotehohäviöitä. Kasvaneen vaihevirran vuoksi myös jännitteenalenema kasvaa. Loistehon siirtäminen jakeluverkossa ei ole kannattavaa.

Loistehon kompensointi on verkon toiminnan kannalta tärkeä asia. Jännitteensäätö toteutetaan loistehotasetta säätämällä. Jännitettä voidaan nostaa tuottamalla loistehoa esimerkiksi kondensaattoriparistoilla. Loistehon tuotanto on edullisinta toteuttaa lähellä sen kulutuskohteita, jolloin vältytään turhalta verkon kuormittamiselta. Suomessa on olemassa loistehoreservejä, jotka ovat sitoutuneet tuottamaan tai kuluttamaan loistehoa sopimuksen nojalla. Sopimukset koskevat kuitenkin pääasiassa kantaverkon loistehotukseen ylläpitoa. [15]

Lisäksi kompensoinnilla pyritään takaamaan siirtokapasiteettia päätteholle. Loistehon siirtäminen verkossa aiheuttaa lisäkustannuksia verkkoyhtiöille. Suomessa verkkoyhtiöt perivät asiakkaalta loistehomaksun, jos asiakkaan ottama loisteho ylittää sopimuksessa määritellyn rajan. Loistehon hinta ja laskutusperiaatteet voivat vaihdella sähköyhtiöittäin. Taulukko 2-1 tuo esille eri verkkoyhtiöiden loistehosta laskutettavia hintoja ja laskutusperusteita.

*Taulukko 2-1. Eräiden suomalaisten sähköyhtiöiden pienjänniteloistehomaksujen hinnat ja laskutusperusteet. [16]*

Yhtiö	Hinta € / kVar,kk	Laskusteho
Helsingin Energia	1,63	$Q_{max,kk} - P_{max,kk} * 40\%$
Fortum	3,50	$Q_{max,kk} - P_{max,kk} * 20\%$
Vantaan Energia	1,40	$Q_{max,kk} - P_{max,kk} * 50\%$
Vaasan Sähkö	2,45	$Q_{max,kk} - P_{max,kk} * 25\%$
Rauman Energia	4,31	$Q_{max,kk} - P_{max,kk} * 20\%$
Oulun Energia	1,27	$Q_{max,kk} - P_{max,kk} * 84\%$



Hajautetun energiantuotannon lisääntyessä loistehon tuotannosta voi tulevaisuudessa muodostua uusi varteenotettava markkina sähköyhtiöille. Viime aikoina on tutkinnan kohteena ollut generaattoreilla tuotettavan loistehon määrä suhteessa tuotettuun pätötehoon. Tutkimuksissa on etenkin arvioitu loistehotuotannon vaatimista investointikustannuksia, sekä menetettyjä myyntituloja tuottamatta jääneen pätötehon vuoksi. Näin on saatu muodostettua erilaisia laskentamalleja loistehon hinnan muodostamiselle. [17]

## 2.6 Sähkön käytön ominaispiirteet

### 2.6.1 Kulutus

Suomessa on sähkön käyttäjiä noin 3,5 miljoonaa. Sähköenergian kokonaiskulutus vuonna 2006 oli n. 90 TWh, josta yli puolet käytettiin teollisuudessa etenkin metsäteollisuuden tuotteiden jalostukseen. Lopusta puolet kului kotitalouksissa ja vajaa puolet oli palvelu- ja julkisensektorin käyttämää. Muutos vuoden 2005 tasosta oli +6 %, joka johtui lähinnä metsäteollisuuden energiankäytön lisääntymisestä.

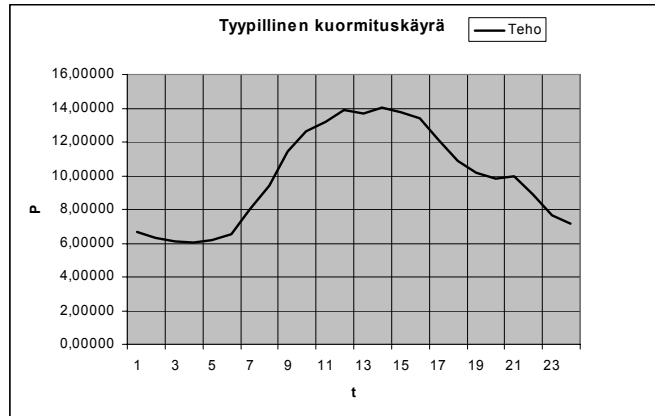
Asuintalojen sähkön käyttö on Suomessa intensiivistä, johtuen suuresta sähköistystiheydestä asuinalueilla sekä sähkölaitteiden määrästä kotitalouksissa. Tyypillisen omakotitalon huipputeho vaihtelee välillä 10–20 kW neliöistä riippuen. Huipputehoarvio saadaan laskettua kaavasta (9). [19]

$$P_{\max} = 7,5 + 49 * A_{\text{läm}} / 1000 = [kW] \quad (9)$$

$P_{\max}$  on rakennuksen sähköliittymän huipputehon tehollisarvo

$A_{\text{läm}}$  on rakennuksen lämmitettävä pinta-ala.

Sähkön käytön tehonvaihteluiden voidaan käsittää riippuvan vuodenaika- ja vuorokausivaihteluista. Kulutushuiput asettuvat usein aamupäiville ja iltapäiville. Vuodenajoista johtuvat kuormitusvaihtelut aiheutuvat luonnollisesti ulkoilman lämpötilan muutoksista, jolloin lämmitystarve ja siirtohäviöt kasvavat. Seuraavassa kuvassa on esitetty amerikkalaisen NYSEG-sähköyhtiön kuormituskäyrä yksityisille käyttäjille, joka kuvaa tehontarpeen muutosta vuorokauden eri tunteina.



Kuva 2-3. Amerikkalaisen NYSEG-sähkøyhtiön kuormituskäyrä yksityisille käyttäjille. Käyrä kuvaa tehontarpeen muutosta vuorokauden eri tunteina. [18]

## 2.6.2 Kuormat taajamassa

Taajama-alueilla esiintyy paljon erityyppisiä ja -kokoisia kuormia jakeluverkon kannalta. Teollisuutta syötetään usein 20 kV -keskijännitteellä, mutta suuritehoiset teollisuuskäytöt voivat vaatia jopa 110 kV -syötön. Teollisuudessa käytettävien sähkömoottoreiden, ohjattujen käyttöjen, muuntajien ja epälineaaristen kuormien vuoksi on tärkeää kiinnittää huomiota verkkoon näkyvään tehokertoimeen. Yleisesti jakeluverkossa tehokertoimen tulisi olla huippukuormalla 0,98, jotta jakeluverkonhaltijan asettamilta loisteholaskuilta vältyttäisiin. Loistehon kompensointi suoritetaan usein yritysten toimesta paikallisesti, jolloin säästytään lisälaskulta. [20]

Pääasiassa kuitenkin yleisimmät kuormat ovat 20/0,4 kV-muuntajaan kytketyt rakennukset kuten kerrostalot, toimistorakennukset, rivitalot ja omakotitalot. Niiden kuormat ovat verkon kannalta helppoja, lähes resistiivisiä kuormia.

Julkiset palvelut ja tärkeät rakennukset on varmistettu varavoimalähteillä paikallisesti. Niille on pyritty myös takaamaan mahdollisimman varma sähköliittymä jakeluverkkoon esim. maakaapeliliittymällä, jolloin sään vaikutus saadaan eliminoidua.

## 2.7 Sähkön laadun hallinta

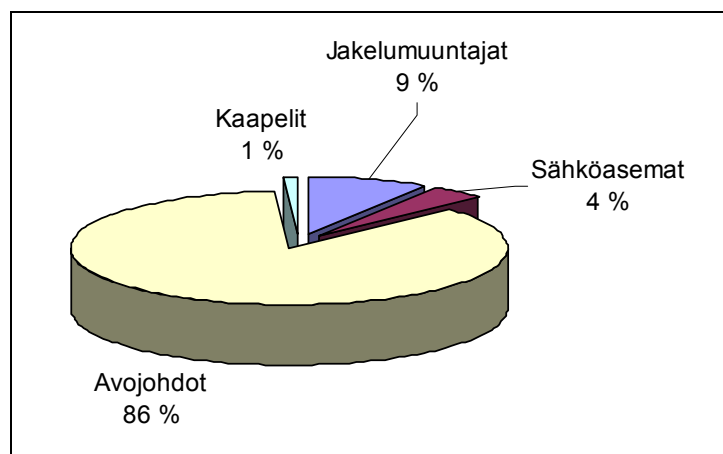
Sähkön laatu muodostuu kahdesta osa-alueesta: jännitteen laadusta ja keskeytysten määrästä. Laadun hallinnalla pyritään takaamaan lähes keskeytymätön sähköjakelu loppukäyttäjille. Verkkoyhtiöille on velvollisuus toimittaa asiakkaille standardin SFS-EN50160 mukaista sähköä. Lisäksi sähkömarkkina-alueilla on verkkoyhtiöille määrätty mahdollisten keskeytysten aiheuttamia sanktioita, jotka lisäävät verkkoyhtiöiden moti-

vaatiota investoida sähkön laadun hallintaan. Hyvälaatuinen sähkö säästää komponentteja ja vähentää niissä tapahtuvia häviöitä. Sähkön laadun hallintaan on alettu kiinnittää enemmän huomiota viime vuosina etenkin taajama-alueilla. Verkossa lisääntyneiden epälineaaristen ja muiden sähkön laatua heikentävien kuormien vuoksi jännitteen laatuun on kiinnitettävä huomiota enenevässä määrin, koska myös herkkien laitteiden määrä jakeluverkoissa lisääntyy.

### 2.7.1 Keskeytykset

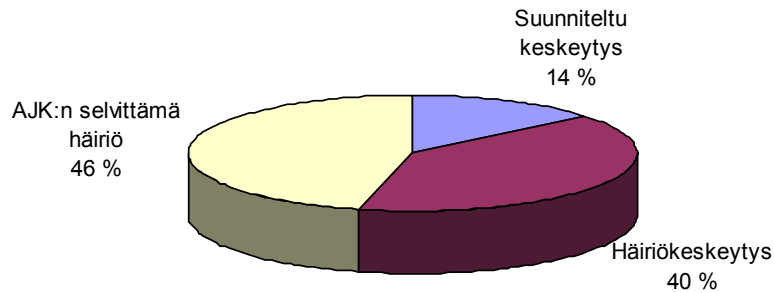
Tärkeille käyttökohteille aiheutuvat vahingot ja yrityksille aiheutuvat kustannukset voivat nousta suuriksi käyttökatojen vuoksi. Taajama-alueilla jakeluverkot ovat pääasiassa kaapeloituja, mikä vähentää vikojen määrää 20–50 % avojohtoihin verrattuna. Maakaapeleissa aiheutuvat maasulut johtuvat usein kaivinkoneista, eristeiden rappeutumisesta, päätteiden tai liitosten vioista tai maannousemisesta. Vian tapahtuessa maakaapelissa vika on pysyvä, ja sen korjaus kestää päiviä. Tämän vuoksi taajaman maakaapeliverkot on suunniteltu renkaiksi, jolloin varayhteyksien käyttö erottimien kytkentöjä muuttamalla on helppoa. [3]

Suomessa keskeytysten määrät vaihtelevat alueittain runsaasti. Paljon avojohtoa sisältävissä jakeluverkoissa vikojen määrä on suurempi. Alla oleva diagrammi tuo esille maakaapeleiden ylivertaisuutta keskeytysten määrässä (Kuva 2-4).



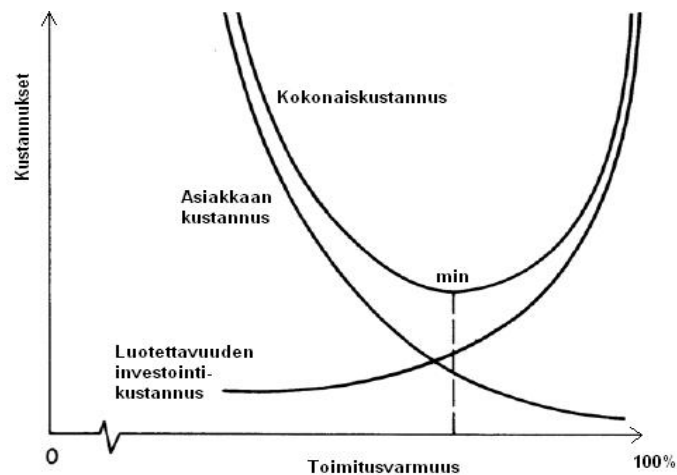
Kuva 2-4. Keskeytysten jakautuminen Suomen jakeluverkoissa eri komponenteille vuonna 2003. [21]

Vikojen lisäksi verkoissa esiintyy myös keskeytyksiä, jotka on suunniteltu verkkoyhtiön toimesta. Keskeytysten esiintyminen on suhteellisen yleistä. Ne ovat kuitenkin välttämättömiä kunnonvalvonnan ja huoltotöiden mahdollistamiseksi. Alla tuodaan esille suunniteltujen keskeytysten suhteellista määrää häiriökeskeytyksiin nähden (Kuva 2-5.).



Kuva 2-5. Pääasialliset keskeytyslajit Suomen jakeluverkoissa vuonna 2003. [21]

Jakeluverkon luotettavuuden parantaminen vaatii investointeja. Investointien suuruus tulee määrittää kohtuulliselle tasolle vastaamaan asiakkaalle aiheutuneita keskeytyskustannuksia. Asiakkaan vaatimustason noustessa sähkön laadun suhteen verkkoyhtiön kustannukset kasvavat voimakkaasti (Kuva 2-6).



Kuva 2-6. Verkkoyhtiön ja asiakkaan kustannusten tasapaino. [22]

## 2.7.2 Jännitteen laatu

Jännitteen laatuun vaikuttaa siinä esiintyvien häiriöiden määrä. Jännitteen laatu määräytyy pääosin jakeluverkon ominaisuuksien perusteella. Verkkoyhtiöt pyrkivät investoimaan sopivassa määrin jakeluverkkoon sähkömarkkinalain velvoittamana kohdassa 2.3.2 mainittujen häiriöilmiöiden poistamiseksi. Häiriöiden poistaminen kokonaan on mahdotonta, eikä se ole teknis-taloudellisesti perusteltuakaan nykyisellä järjestelmällä.

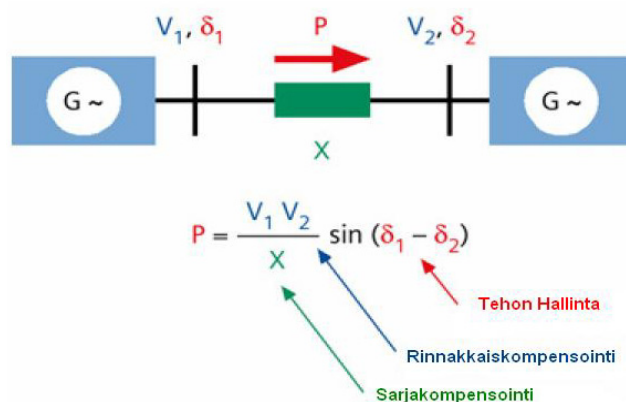
Huonosta jännitteen laadusta aiheutuu usein suurimmat kustannukset teollisuudelle. Prosessiteollisuuden laitteet voivat olla herkkiä standardista poikkeavalle jännitteelle. Vikaantuneen laitteen aiheuttamasta keskeytyksestä syntyvät kustannukset kasvavat

nopeasti keskeytysajan funktiona johtuen prosessiteollisuuden intensiivisyydestä. Aiheutuneet kustannukset voivat koostua tuotantomenetyksistä, korjauskuluista, ylityökorvauksista, viivästyssanktioista ja uudelleenkäynnistyskuluista. Asuintalojen laitteille jännitteen laadulla ei ole ollut niin suurta merkitystä. Esimerkiksi pienet jännitekuopat voivat näkyä ainoastaan valojen välkähtämisinä. Markkinoilla olevat kodinelektronikkalaitteet kestävät melko hyvin kohtuullisia ylijännitteitä ja jännitekuoppia. Jännitekuopan sattuessa laitteet pääasiallisesti vain pysähtyvät/sammuvat ilman vioittumista ja ne voidaan käynnistää uudelleen. [23]

### 2.7.3 FRIENDS ja FACTS

Uusin jakeluverkon ajatussuunta, jota etenkin Japanissa on jo toteutettu, on FRIENDS (Flexible, Reliable and Intelligent Energy Delivery System). FRIENDS-järjestelmässä tuotetaan eri laatuista sähköä asiakkaille sähkönlaatuasemien välityksellä. FRIENDS-verkon konfiguraatiota voidaan muuttaa nopeasti ja joustavasti vian sattuessa ja sähkönlaatuasemien avulla hoidetaan kuormien vaihtelut, jännitevaihtelut ja harmonisten yliaaltojen hallinta. Järjestelmään liittyvä oleellinen toiminto on myös tehokas ja reaaliaikainen kysynnän hallintajärjestelmä (DMS). Sähkönlaatuasemien käyttöä on tutkinut myös Hannu Hätönen diplomityössään [58]

Sähkötekniikan alan termi FACTS (Flexible AC Transmission Systems) käsittää lukuisia sähkön laadun hallinnan laitteita (Taulukko 2-2). Niihin luetaan perinteiset kompensointilaitteet sekä kehittyneen tehoelektronikan tarjoamat uudet ratkaisut. Laitteilla pyritään parantamaan sähköverkon toimintavarmuutta, kapasiteettia ja ennen kaikkea joustavaa toimintaa. Energiavarastoja voidaan käyttää niiden tukena eliminoimassa pitempiluoontoisia käyttökatkoksia, mutta varastojen käyttö suoraan verkkoon kytkettyinä on myös mahdollista ilman näiden laitteiden apua.



Kuva 2-7. FACTS-laitteiden toiminnan perustana on vaihtovirtatehon siirron peruskaava: tehokulmayhtälö.  $V$  = jännite,  $\delta$  = tehokulma,  $X$  = reaktanssi ja  $P$  = siirtyvä teho. [23]

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 2-7) esitetystä vaihtovirtatehon perusyhtälössä voidaan nähdä FACTS-laitteiden toiminnan kolme pääasiallista osa-aluetta, sarjakompensointi, rinnakkaiskompensointi ja tehonhallinta. Sarjakompensoinnin tarkoituksena on vähentää siirtojohdon induktanssia eli lyhentää johdon sähköistä pituutta, jolloin voidaan siirtää enemmän tehoa. Rinnakkaiskompensoinnilla säädetään loistehotasapainoa eli periaatteessa stabiloidaan jännitettä.

*Taulukko 2-2. Sähkön laadun hallintaan soveltuvia laitteita ja esimerkkejä niiden valmistajista. [23]*

Lyhenne	Engl. nimitys	Nimitys	Laitevalmistaja
SA	Surge Arrester	Ylijännitesuoja	ABB
BES	Battery	Akut	Exide, Yuasha, Matsushita, Jonson, JSB, Varta
STATCOM	Static synchronous compensator	Staattinen tahtikompensaattori	ABB, Siemens, S&C Electric Company
DSC (D-VAR ja SuperVAR)	Dynamic synchronous condenser	Dynaaminen tahtikompensaattori	American Superconductor
DSC	Dynamic series compensator	Sarjakompensaattori	Nokian Capacitors, ABB
DVR	Dynamic voltage restorer	Dynaaminen jännitteen säätäjä	ABB, Siemens, S&C Electric Company, American Superconductor
PFCC	Power factor correction capacitor	Tehokerrointa korjaava kondensaattori	Toshiba, Hitachi
SMES (esim. DVR ja UPS)	Superconduction magnetic energy storage	Suprajohtava magneettinen energiavarasto	American Superconductor, Toshiba
SETC	Static electronic tap changer	Staattinen sähköinen käämikytkin	ABB
SSTS	Solid-state transfer switch	Elektroninen vaihtokytkin	Powerware, MGE, Toshiba, Chloride, GE
SSCB	Solid-state circuit breaker	Elektroninen katkaisija	Siemens, ABB, GE
SVC	Static var compensator	Staattinen loistehon kompensaattori	ABB, Nokian Capacitors
TCS	Thyristor switched capacitor	Tyristorikytketty kondensaattori	ABB, Nokian Capacitors
UPS	Uninterruptible power supply	Keskeytymätön sähkön syöttölaite	Powerware, APC, Toshiba, MGE, Chloride, GE, S&C Electric
APF(TF)	Active power filter (tuned filter)	Aktiivisuodin	ABB, Nokian Capacitors

## 2.8 Jakeluverkon kehityssuunta

### 2.8.1 Kustannusrakenne

Verkkoyhtiöiden kustannukset jakeluverkon ylläpidon ja liiketoiminnan kannalta muodostuvat neljästä eri kustannustekijästä:

- investointikustannukset
- käyttökustannukset
- keskeytyskustannukset
- kunnossapitokustannukset.

Jakeluverkon kehityksen viemiseksi oikeaan suuntaan tulisi jatkaa verkkoyhtiöiden investointien ja käyttötoiminnan ohjaamista eri keinoin. Jakeluverkolla on merkittävä rooli loppuasiakkaan sähkön hinnassa ja laadussa. Yli 50 % asiakkaan sähkön hinnasta muodostuu jakeluverkon kustannuksista ja yli 80 % vioista aiheutuu keskijänniteverkossa. Asiakkaiden kasvavien vaatimuksien vuoksi sallitun tuoton laskemiseen joudutaan kiinnittämään erityistä huomiota. Verkkoyhtiöiden kustannukset kasvavat sähkön laadun hallintaan ja vanhentuviin komponentteihin tehtävien investointien vuoksi.

Verkkoliiketoiminnan ominaispiirteistä johtuen toiminta tulee pysymään hajautettuna valtakunnallisesti. Verkkoliiketoiminta on säädeltyä monopolia paikallisesti, koska se on aluesidonnaista liiketoimintaa. Verkkoyhtiöillä on sidottu niin paljon pääomaa jo olemassa oleviin jakeluverkkoihin, että verkkoyhtiön ei ole kannattavaa luopua monopoliasemasta myymällä verkkoinfrastruktuuriaan, eikä kilpailijoiden kannata investoida juurikaan toisten verkkoyhtiöiden alueille. [22]

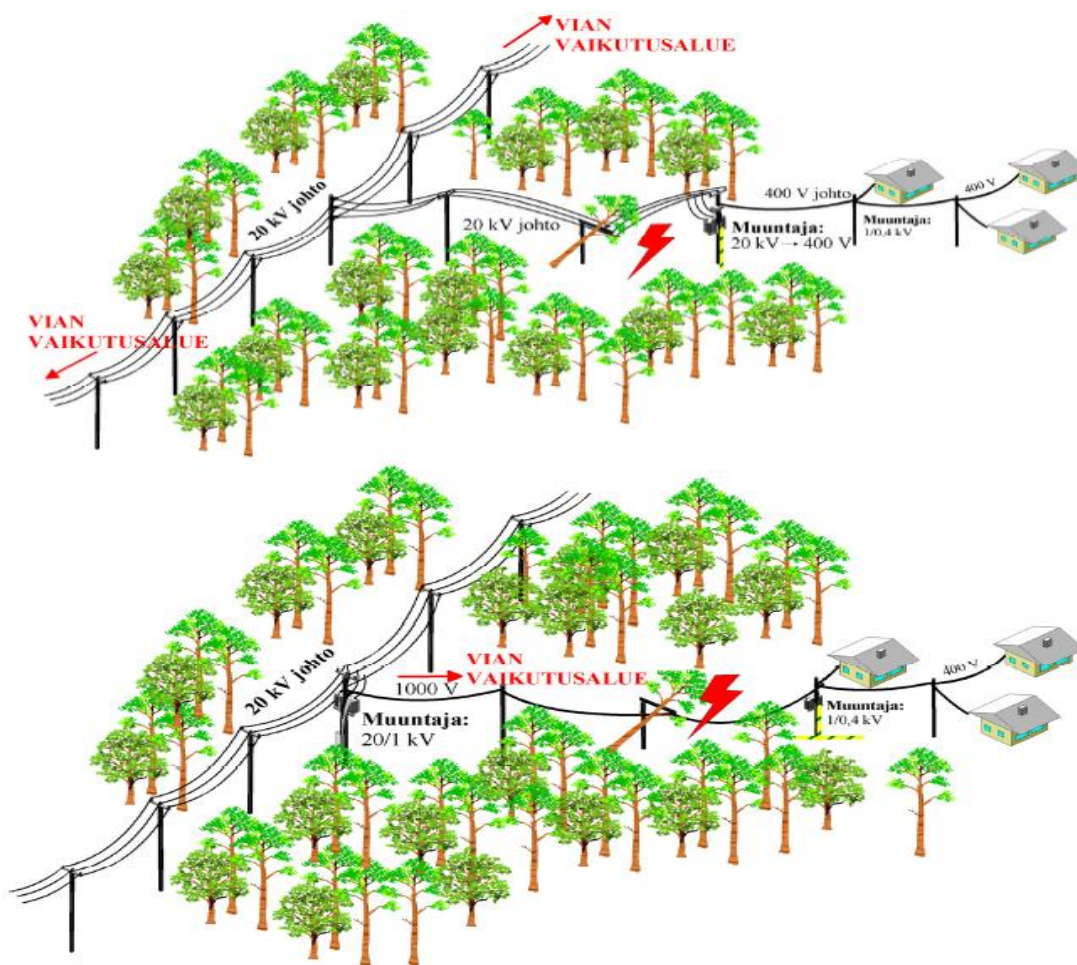
### 2.8.2 Tekninen kehitys

Jakeluverkkojen kehitys ja uusiutuminen on käytännössä melko hidasta komponenttien pitkien pitoaikojen vuoksi. Perusverkkotekniikan seuraava kehitysaskel voi olla 1 kV -jänniteportaan käyttöönotto joillakin alueilla ja tätä kautta keskeytysten vähentäminen loppuasiakkailta. Lisäksi hajautetun energiantuotannon todennäköinen lisääntyminen ja luonne vaativat muutoksia jakeluverkon suojaukseen ja topologioihin.

Eräs jakelun luotettavuutta parantava tekijä on myös ilmajohtojen korvaaminen maakaapeleilla. Maakaapeliverkot ovatkin lisääntymässä ja ne, vaikkakin investointikustannuksiltaan kalliimpina, tuovat myös etuja helpomman huollon ja maisemallisten arvojen takia.

Tietoliikenneyhteyksien yleistymisen ja kehityksen on johtanut halvempiin ja nopeampiin ratkaisuihin. Verkon ohjauksen ja kulutuspuisteiden dataa voidaan siirtää entistä kustannustehokkaammin käytönvalvontakeskukselle. Tietoliikenneyhteyksien kehitys mahdollistaa myös rakennuksien sähköenergiankulutuksen mittauksen tuntitasolla. Tuntitaso mittaus luo sähköyhtiön toimintaan uusia mahdollisuuksia. Tarkemmat ja monipuolisemmat mittarit mahdollistavat sähkön laadun hallinnan tehostamisen. Voidaan esimerkiksi tarkkailla asiakkaan kokemia keskeytyksiä ja jännitteenlaatua perinteisen kulutusmittauksen lisäksi.

EU:n pienjännitstandardin LVD 72/23/EEC mukaan 1 000 V luokitellaan pienjännitteeksi, jolloin sen käyttö samoissa 400 V:n johdoissa on mahdollista ilman suurempia muutoksia. Alla on havainnollistettu 1 kV -jänniteportaan topologiaa (Kuva 2-8). Kuvasta voidaan nähdä, kuinka keskijännitejohdon vika perinteisellä 20/0,4 kV -jakelujärjestelmällä näkyy kaikilla 20 kV -johdon käyttäjillä. Uudella 20/1/0,4 kV -järjestelmällä vika saadaan rajattua 1 kV -lähden takana oleville käyttäjille.



Kuva 2-8. Perinteisen 20/0,4 kV ja uuden 20/1/0,4 kV -jakelujärjestelmän vertailu oletetussa vikatilanteessa. [3]



1 kV -jänniteportaan taloudellinen käyttöalue on kuitenkin melko rajattu. Maksimijohtopituuden määrittelee käytännössä jännitteenalenema ja minimipituuden kustannusero keski-jännitejohtoon. Seuraavassa on lueteltu 1 000 V -jänniteportaan käyttöönoton hyötyjä: [24]

- suurempi jännite mahdollistaa suuremman tehon samoilla johdoilla
- muuntopiirin lisäys vähentää vikojen laajuutta (20/1/0,4 kV vs. 20/0,4 kV)
- komponentit jo olemassa
- keskijänniteverkko lyhenee, vähemmän vikoja
- ei lisää jännitteen alenemaa kuluttajalla.

### 2.8.3 Organisaatio ja omistus

Verkkoyhtiöiden omistajien vaatimukset ja odotukset pääoman tuotolle luovat paineita toiminnan tehostamiselle. Toisaalta sähkön laadun vaatimukset kasvavat ja lisätuoton saavuttelu halvemmilla ratkaisuilla on pois suljettua. Kuluttajahintojen muodostumiseen kiinnitetään enemmän huomiota. Organisaatioiden tehostaminen ja kehittäminen voisi säästää kustannuksia. Verkkoyhtiöiden ei tarvitsisi omistaa kaikkea osaamista, vaan yhä useammat toiminnot ulkoistetaan.

Tulevaisuudessa verkon käyttäjä voi olla eri kuin verkonhaltija. Segmentoinnilla pyritään tehokkaampaan resurssien käyttöön. Syntyy yrityksiä, jotka tarjoavat verkon käytönhallinnan palveluja. Yritykset voivat hoitaa monen eri verkon käytönhallinnan samanaikaisesti, jolloin verkonhaltija välttyy oman käytönhallintakeskuksen investoinneilta. Tämä ei ole kuitenkaan mahdollista ennen tietoliikennejärjestelmien selkeää asemaa verkonhallinnassa. Tällöin käytönhallinnan ulkoistaminen voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti esimerkiksi vain luomalla tietoverkkoyhteydet palvelua tarjoavan yrityksen valvomoon. Verkonhaltijan rooli on tällöin olla huolestunut verkkoon sijoitetun pääoman tuotosta. Lisäksi verkonhaltijalla on valta monopolin valvontaan.

Verkkoliiketoiminnan pirstaloituminen on nähtävissä jo nyt. Sähkömarkkinalakiin säädettiin pykälä, jossa sähkön myynti ja siirtopalvelut tulee yhtiöittää erilleen. Järjestelyllä pyrittiin rajoittamaan paikallisia monopoleja ja helpottamalla verkkoyhtiöiden siirtomaksujen katteiden seurantaa. Verkkoliiketoimintaan liittyvien eri palvelujen ulkoistaminen luo mahdollisuuksia organisaation tehokkaammalle toiminnalle. Näitä voisivat olla esimerkiksi huollot, asennukset, asiakastuki, laskutus, sähkösopimukset ja verkon suunnittelu. Jos organisaatio käyttäisi ulkoistettuja resursseja optimoidusti, niin voitaisiin ylimääräisiä kustannuksia välttää, koska resurssien optimointi muuttuvissa tilanteissa tehostuisi. [22]

## 2.8.4 Asiakkaiden intressit

Jakeluverkon asiakkaiden tarpeet vaihtelevat asiakastyypin mukaan mutta tyypillisesti tavoitteena on:

- edullinen sijainnista riippumaton hinta
- hyvä sähkön laatu
- sähköyhtiön riittävä palvelutahto ja -kyky
- ympäristöystävällisyys
- minimaaliset häiriötekijät
- mahdollisuus myydä sähköä kilpailukyiseen hintaan, jos on omaa ylimääräistä tuotantokapasiteettia.

Asiakkaiden asema sähköenergian arvoketjussa tulee pysymään ennallaan tai hajautetun tuotannon mukana kuluttaja/tuottaja-asiakkaan merkitys voi kasvaa. Asiakkaan vaikutusvalta sähkön hintaan on pieni. Vapaan sähkömarkkinan vuoksi asiakkaan sijainnilla ei ole periaatteessa merkitystä, mutta toisaalta, jos asiakkaalla on erittäin herkkiä kuormia, voi alueelle toimitettavan sähkön laadun taso olla merkittävä tekijä. [25]

## 2.9 Yhteenveto

Luvussa 2 käytiin läpi taajaman nykyisen sähkönjakelun ominaispiirteitä sekä sähkön laadun näkökulmasta että myös nykyisen jakeluverkon tarjoamia mahdollisuuksia ja kehitysnäkymiä. Asiakkaiden tarpeiden kasvaessa tulevaisuudessa ja hajautetun tuotannon yleistyessä nykyisen muotoinen sähkönjakeluverkko on saavuttanut teknistaloudellisen rajansa. Sähköyhtiöt eivät pysty investoimaan sähkön laadun parantamiseen nykyisillä sähkön hinnoilla niin paljon, että laatu parantuisi olennaisesti. Tarvitaan uusia teknisiä ratkaisuja ja topologioita, joilla päästään vanhoista ongelmista lähes täysin eroon ja parannetaan sähköyhtiöiden mahdollisuuksia vastata asiakkaiden kasvaviin tarpeisiin. Seuraavassa luvussa 3 kuvaillaan uusia mahdollisuuksia tarjoava taajaman DC-jakeluverkko samoista näkökulmista, kun tässä luvussa esitetty nykyinen AC-jakeluverkko. Tarkastelu lähtee liikkeelle DC-jakeluverkon periaatetasolta, jonka jälkeen syventyen tarkemmin verkon teknisiin yksityiskohtiin. DC-jakeluverkon tarjoamia mahdollisuuksia hajautettujen energiajärjestelmien energian hallintaan käsitellään luvussa 7.

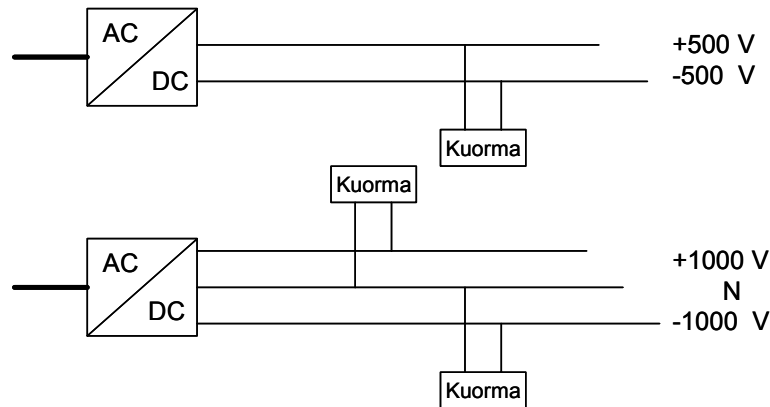
## 3. Taajaman tasajännitejakeluverkon rakennemahdollisuudet

### 3.1 Johdanto

Peruslähtökohtana taajaman jakeluverkon toteutuksessa tasajänniteverkkona on paitsi sähkön laadun parantaminen loppukäyttäjillä myös kokonaisvaltaiset kustannus- ja energiatehokkuusnäkökohdat. Tasajännite mahdollistaa mm. energiavarastojen ja hajautetun tuotannon kytkeytymisen verkkoon tehokkaasti. Tasajänniteverkkoa voitaisiin syöttää joko muuntajan ja tasasuuntaajan kautta kantaverkosta tai se voisi toimia itsenäisenä mikroverkkorenkana käyttäen omaa hajautettua tuotantoa energianlähteenä. Näin jakeluverkosta saataisiin erittäin redundanttinen ja joustava järjestelmä edellyttäen, että saarekekäytössä on saavutettavissa tehotasapaino.

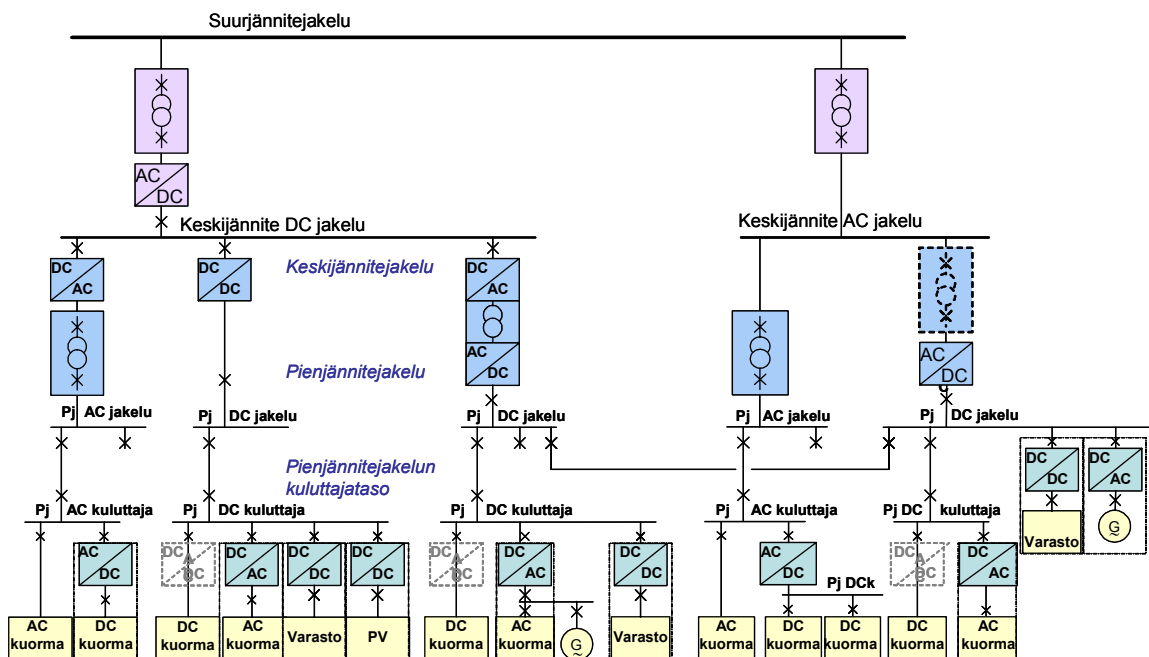
Tasajännitejakelun toteuttamiseen on lukuisia eri mahdollisuuksia. Tässä luvussa käsitellään tasajännitejakeluverkon perusrakenteiden eri ratkaisumahdollisuuksia. Kuluttajan kannalta tasajännitejakelun ei tarvitse näkyä käytännössä lainkaan, jos tasajännitettä käytetään esim. vain keskijännitteellä ja tasajännite muunnetaan vaihtojännitteeksi ennen loppuasiakkaan liityntää. Toisaalta tasajännitejakelu voi ulottua kuluttajalle asti, jolloin kuluttaja voisi hyötyä tasajänniteliitynnän tuomista eduista. Tänä päivänä kuluttajatasolla on lukuisia sekä kulutus- että energiantuotantolaitteita, joiden liityntä tasajänniteverkkoon voisi olla kustannus- ja energiatehokkaampaa, kun AC/DC- ja DC/AC-muunnoksista vältyttäisiin. Tyypillinen esimerkki on tietotekniikan ja audiovisuaalisen tekniikan laitteet, joiden sisäinen käyttöjännite on tasajännite. Kiinteistöjen energiantuotantolaitteista aurinkokennot ja polttokennot antavat ulos tasajännitettä, jolloin myös niiden kytkeminen jakeluverkkoon olisi yksinkertaisempaa DC/DC-katkojan avulla. Pientasajännitteen käyttö kiinteistöjen jakelujännitteellä voisi olla myös merkittävä turvallisuutta parantava tekijä.

Tasajännitejakeluverkon periaatteellinen rakenne koostuu tasajännitekiskosta, joka on kytketty yhtenäiseksi renkaaksi. Käytännössä tasajännitekisko koostuu kahdesta rinnakkain kulkevasta kaapelista. Toisessa kaapelissa on positiivinen ja toisessa negatiivinen napa (Kuva 3-1). Kolmijohtimista mallia käytetään ainoastaan erittäin korkeilla jännitteillä. Kuormat ja lähteet kytkeytyvät näiden kahden kaapelin väliseen jännitteeseen. Verkkoa syötetään kantaverkosta keskijänniteverkon kautta. Normaalisissa tiloissa kuormat ottavat tarvitun tehon vaihtojännitesyötön tai hajautetun tuotannon kautta. Verkossa voi myös olla varateholähteenä energiavarastoja, jotka takaavat tehollisen esimerkiksi vaihtojännitesyötön käyttökatkoksen ajaksi.



Kuva 3-1. Kaksi (ylempi) ja kolmijohdin- (alempi) -ratkaisut tasajännitejako- verkolle.

Tasajänniteverkko voidaan siis toteuttaa perinteisenä verkkomuotona tai rengasverkko- na ja energiavarastoja ja/tai hajautettua tuotantoa sisältävänä itsenäiseen toimintaan pys- tyvänä mikroverkkona (microgrid). Tasajännitejako voidaan toteuttaa myös usealla eri jännitetasolla [67]. Tasajännite voi olla käytössä vain jakeluverkon keskijänniteosassa, mikä toisi etua etenkin pitkien kaapelietäisyyksien ollessa kyseessä. Tasajännitteellä voi- daan myös toteuttaa verkon koko pienjännitejako (75–1 500 V) tai vain osa siitä tai sekä keskijännite- että pienjännitejako (Kuva 3-2).



Kuva 3-2. Esimerkki tasajänniteverkon toteutuksesta eri jännitetasoilla ja topologioilla.

## 3.2 Jännitetasot ja maadoitus

Tasajännitejakeluverkkojen jännitteelle ja sen laadulle ei ole määritelty suoranaisesti minkäänlaista standardia. Syynä on luonnollisesti tekniikan kypsyysaste. Tasajänniteverkkojen suunnittelun pohjana olisi viisasta käyttää jo olemassa olevia standardeja eri verkkoon liittyvien komponenttien osalta. Standardit muodostetaan usein toisiaan tukeviksi, jolloin jo olemassa olevien standardien käyttö suunnittelussa minimoisi tulevat muutokset ja investoinnit tasajänniteverkkoon.

Laivojen sähköjärjestelmille tarkoitettuja standardeja löytyy useita eri luokituslaitoksilta, kuten Det Norske Veritas, Lloyds ja Germanischer Lloyd. Näiden lisäksi löytyy myös voimaloiden ja sähköasemien DC-jännitteellä toimiville lisäjärjestelmille tarkoitettu standardi IEC 61660-1. Junaliikenteessä käytetyistä tasavirtajärjestelmistä saatua kokemusta suunnittelun ja eri komponenttien osalta voitaisiin myös hyödyntää standardien suunnittelussa. Raitiovaunu- ja metroluokituksissa on kokemuksia 500–1 000 V DC -jännitteistä, sekä junaliikenteessä vastaavasti 1 000–3 600 V DC -jännitteistä riippuen sovellusten laajuudesta. Turvallisuussyistä yli 1 000 V:n jännitteitä ei käytetä kiskopalkeissa, vaan käytössä tulee olla erilliset riippujohdot. [29]

Pienjännitedirektiivi 73/23/EEC määrittelee pienjännitteeksi 75–1 500 V tasajännitettä. SFS 6000 käsittelee suojausmenetelmiä ja kohdassa ”suojaus sähköiskulta” käsitellään myös tasajännitteen jännitealueita. Standardin HD 193 (IEC 60449) mukaan jännitealue I on tarkoitettu käytettäväksi asennuksissa, joissa suojaus sähköiskulta toteutetaan määrättyissä olosuhteissa riittävän pienellä jännitteellä sekä asennuksissa, joissa jännite on rajoitettu toiminnallisista syistä. Jännitealue II sisältää jännitteet, joita käytetään syöttämään asuin-, liike- ja teollisuusasennuksia. Jännitealueista I ja II käytetään nimitystä pienjännite ja suuremmista jännitteistä nimitystä suurjännite. Standardin HD 193 mukaiset tasajännitealueet ja niitä vastaavat maadoitusmenetelmät on esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 3-1).

Taulukko 3-1. Jännitealueet tasajännitteellä (HD 193).

Jännitealueet	Maadoitetut järjestelmät		Eristetyt järjestelmät ja järjestelmät, joita ei ole tehollisesti maadoitettu*
	Navasta maahan	Napojen välillä	Napojen välillä
I	$U \leq 120$	$U \leq 120$	$U \leq 120$
II	$120 < U \leq 900$	$120 < U \leq 1500$	$120 < U \leq 1500$

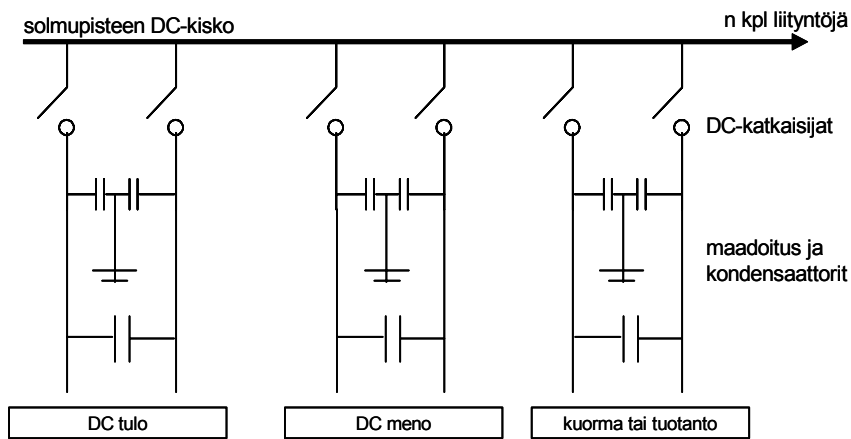
$U$  = asennuksen nimellisjännite (volteina)  
 \* Jos keskijohdinta käytetään, navan ja nollan väliltä syötetty sähkölaite on valittava siten, että sen eristys vastaa napojen välistä jännitettä.

DC-järjestelmien sähköturvallisuus tulisi ottaa huomioon myös pienempien erillisjärjestelmien standardoinnissa. Saksalaisessa standardissa *The New German Safety Standard for Residential PV Systems* on huomioitu myös käyttäjien sähkötekniikan valmiustaso. Standardi on laadittu aurinkokennosovellusten suunnitteluun ja käyttöön kotitalouksissa. Standardissa käsitellään etenkin laitteiden maadoitustapaa sekä eristeiden suojausluokista ja sen määrittämistä eri tasajännitteille. [26]

DC-jakeluverkon maadoituksen toteuttaminen on myös riippuvainen käytössä olevien suuntaajalaitteiden ominaisuuksista. Käytettävillä suuntaajilla ei pystytä hallitsemaan nollajärjestelmän 3. harmonisten virtaa. Kuormien ja lähteiden välillä voisi kulkea melko suuriamplitudisia nollavirtoja. Tämän vuoksi DC-verkkoon kytkeytyvät kuormat ja lähteet ovat maadoittamattomia tai ne on maadoitettu suuren impedanssin kautta, jolloin nollajännitteen heilahtelun aiheuttamat virrat saadaan vaimennettua tehokkaasti.

Tasajänniteverkon solmupisteet tulisi maadoittaa. Eräs toteutustapa on maadoittaa solmupisteet kapasitanssin kautta. Kohdassa 4.3 jo mainittiinkin, että maadoituskondensaattoreiden mitoitus tapahtuu kaapelin ominaisuuksien perusteella. Kondensaattorit mitoitetaan siten, että maasulkuvirran aikavakio saataisiin riittävän suureksi, ja releiden havahtuminen olisi varmempaa etenkin pieni-impedanssisten vikojen sattuessa. Toisaalta aikavakio ei saa kasvaa liian suureksi, etteivät liian pitkät suuri-impedanssiset viat aiheuttaisi vaaratilanteita ihmisille. Jotta molemmat ehdot täyttyisivät, tulee kondensaattorin koko valita suuri-impedanssisen vian havaitsemiseen tarvittavan ajan mukaan, joka vastaa ihmisen ominaisresistanssia (3 000  $\Omega$ ). [32]

Solmupisteiden maadoittamiseen tulisi käyttää kahta maadoituskondensaattoria. Tämä johtuu siitä, että tasajänniteverkon keskipisteessä on kaikkein vakain potentiaali, ja kaikki järjestelmän solmupisteet käyttävät sitä referenssipisteenä jännitteelle. Näin saadaan jänniteheilahtelun aiheuttamat ongelmat lokalisoitua eri osa-alueille. Alla on esitetty suojauskondensaattoreiden käyttö maadoituksessa (Kuva 3-3). Lisäksi kuvasta tulee ilmi katkaisijoiden sijoittelu solmupisteessä, jolloin mahdollistetaan minkä tahansa kaapelisegmentin pois kytkentä. [32], [41]



Kuva 3-3. Tasajänniteverkon solmupiste toteutettuna erillisellä DC-kiskolla. Suojauskondensaattoreiden käyttö maadoituksessa ja katkaisijoiden sijoittelu.

Solmupisteiden välisillä releillä on kommunikaatioyhteys. Vian sattuessa jossakin verkon osassa kytketään kyseinen kaapelisegmentti pois verkosta sen päissä olevien solmupisteiden katkaisijoiden avulla. Molempien releiden tulisi havaita vika samanaikaisesti ja lähettää kytkentäkäskeä kyseisen kaapelin toiselle solmupisteelle. Tämän vuoksi jokaisella solmupisteellä tulisi olla releet, joilla on kaksi vikasignaalin käsittelevää porttia. Toinen on lähettämistä ja toinen vastaanottamista varten. Näin voidaan saada selektiivisyys varmennettua. [32]

Yllä mainittu kommunikaatio releiden välillä on tehokas tapa suojauksen toteuttamiseen. Vaikka verkosta puuttuu kaapeliosuuksia, sen käyttöä voidaan jatkaa pirstaloituneenakin useiden vikojen tapauksessa. Ideaalisessa tapauksessa jokaiselle kaapeli-osuudelle tulisi sijoittaa joko tuotantoa tai energiavarastoja, jotta verkon toiminta olisi turvattu sen jakautuessa pieniin osiin.

Tasajänniteverkon jännite toimii verkossa kaikkien siihen liittyvien laitteiden yhteisenä referenssiarvona. Sen pitäminen vakaana on verkon toiminnan kannalta erittäin tärkeää. Etuna voidaan pitää sitä, että eri tehoisia tuotantomuotoja voidaan käyttää yhtäaikaaisesti ja niiden ohjaus on mahdollista jännitteen avulla. Tasajänniteverkossa ei tarvitse huolehtia esimerkiksi loistehotasapainosta.

### 3.3 DC-verkko kuluttajalla

#### 3.3.1 Yleistä

Vaihtojännite yleistyi 1900-luvun alkupuolella kiinteistöjen jakelujännitteenä, kun kiinteistöjen energiankulutus nousi sähkölaitteiden kuten liesien, kylmälaitteiden, pesuko-

neiden ja lämmityslaitteiden käytön lisääntyessä tekniikan kehityksen ja kuluttajien elintason nousun myötä. Tänä päivänä kuitenkin tietotekniikan lisääntynyt käyttö ja toisaalta ajatukset ns. matalaenergiatalojen lisääntymisestä mm. aurinkoenergiaa hyödyntäen ovat tuoneet uudelleen tarpeen tarkastella tasajännitteen käyttömahdollisuuksia myös kiinteistötasolla. Aurinkokennojärjestelmät ja polttokennot tuottavat suoraan tasajännitettä, joten tänä päivänä tarvittavalta DC-AC-muunnokselta vältyttäisiin. UPS-laitteet ja niihin yhdistetyt akustot mahdollistavat energian talteenoton ja sähkökatkojen puskuroinnin. Monet kiinteistöjen käyttölaitteet toimivat myös tasajännitteellä, ja monien laitteiden sisäinen käyttöjännite on tasajännite, joksi liitäntäpisteen vaihtojännite muunnetaan muuntajan ja AC-DC-muuntimen avulla.

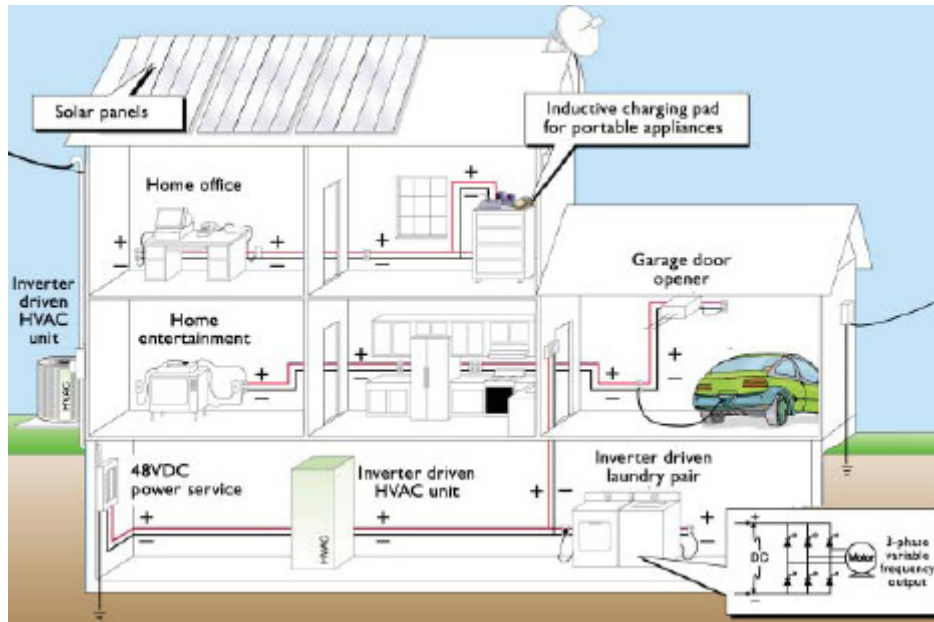
### 3.3.2 Asuinkiinteistön DC-jakelu

Vaikka vaihtojännitejakelu on kiinteistöissä tyypillinen, löytyy kiinteistöihin lukuisia tuotteita, jotka voisivat liittyä tasajännitteeseen joko suoraan, DC/DC-muuntimen tai AC/DC-muuntimen avulla:

- Liedet (vastukset)
- Lämmityspatterit (vastukset)
- Valaisimet (hehkulamput, [loistelamput](#), led-lamput ja halogeenilamput)
- Ohjauselektronikka
- Tietotekniikan laitteet (tietokoneet, audio- ja videolaitteet, joiden sisäinen käyttöjännite on DC)
- Käsityökalut
- Sähkömoottorit, joko suoraan tasajännitteeseen ja säätö DC/DC- muuntimella tai vaihtovirtamoottorit DC/AC-muuntimen (invertterin) avulla.
- Aurinkokennot, polttokennot, mikrovesiturbiinit, akut, patterit ja superkondensaattorit
- Tuulimyllyt, mikroturbiinit, ja vauhtipyörät AC/DC-muuntimen välityksellä
- Sähköautot ja hybridautot (akkujen lataus ja purkaus tarvittaessa verkkoon).

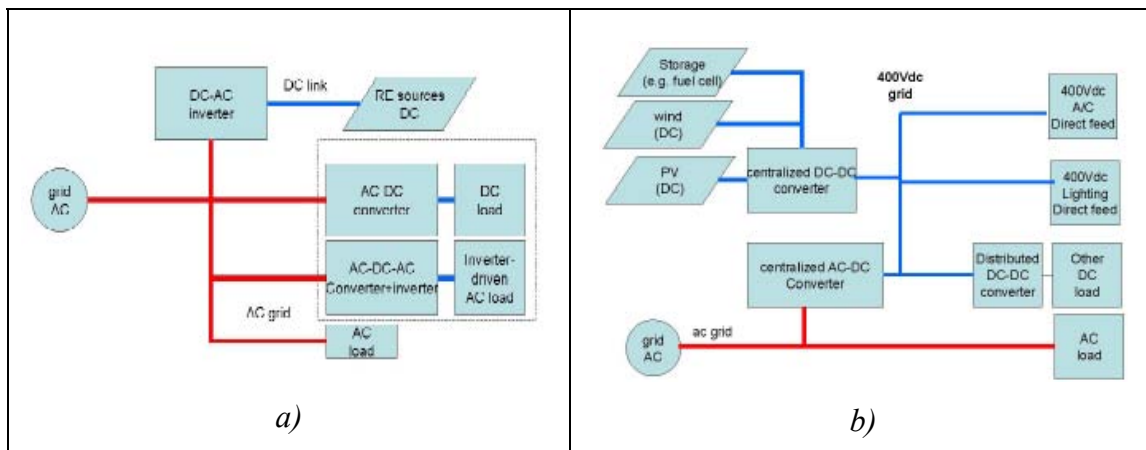
DC/DC-muuntimien avulla tasajänniteverkkoon voidaan myös helposti liittää eri liitintäjäjännitteen omaavia DC-laitteita, joten periaatteessa riittäisi vain perusverkon jännitetaso yhtenäistämisen. Seuraavassa kuvassa (Kuva 3-4) on visioitu tulevaisuuden kodin DC-jakelujärjestelmää [73].





Kuva 3-4. Visio DC-jakelusta tulevaisuuden kodissa. [73]

Pientasajännitteen käyttö (esim. nykyiset tyypilliset 12 V, 24 V ja 48 V tai yleensäkin suojajännitealue 0–42 V) kiinteistöjen jakelujännitteenä tai sen osana parantaisi kiinteistöjen ja etenkin asuinkiinteistöjen turvallisuutta. AC-DC- ja AC-DC-AC- muunnosten jääminen pois lisäisi energiatehokkuutta, vähentäisi kustannuksia ja myös tyhjäkäyntihäviöt voisivat pienetä. Elektroniikkalaitteissa ja esim. autojen sähkölaitteissa käytettäviä tasajännitetasoja ovat tänä päivänä mm. 12 V, 24 V, 48 V tai 120 V. Kiinteistöissä käytettävä tasajännitetaso ohjauslaitteissa voisi olla 24 VDC ja muu jakelujännite HD 193:n (katso Taulukko 3-1) mukaan esim. 120 VDC, vaikkakin jännitteen pienentäminen (vrt. 240 VAC) toisaalta merkitsee vakioitehoisilla laitteilla suurempaa virtaa, mikä taas voisi lisätä kaapelointikustannuksia. Kiinteistöjen syöttöjännite voisi olla HD193:n mukaan maks. 900 VDC navasta maahan tai maks. 1 500 VDC napojen välillä maadoitetussa järjestelmässä tai nykyinen AC- verkko, jolloin liittynässä tarvittaisiin AC/DC-muunnin. Myös nykyisen vaihtovirtaverkon jännitetasoa on ehdotettu [60] kiinteistön tasavirtaverkon jännitteeksi (Kuva 3-5).



Kuva 3-5. Eräs ehdotus kiinteistön jakelujärjestelmäksi: a) nykyinen AC-jakelu, b) esi-  
merkki AC-verkkoon liitetystä DC-jakelusta. [60]

Kaksisuuntaisen liittymän omaavat kiinteistön omistajat voisivat hyödyntää kiinteistö-  
solla olevaa ylimääräistä energiantuotantoaan myös myymällä sitä verkkoon. Kiinteis-  
tön energiantuotantolaitteilla ja varastoilla voitaisiin myös tasata paitsi kiinteistön  
kuormitushuippuja myös jakelualueen kuormitusta.

### 3.3.3 ATK-keskusten DC-jakelu

Eräs tyypillinen kiinteistöalue, joissa tasajännitejakeluun siirtymistä harkitaan tänä päi-  
vänä, ovat ATK-keskukset. Lawrence Berkeley National Laboratorion tutkimuksen [59]  
mukaan voidaan ATK-keskuksissa saavuttaa yli 28 %:n energiasäästöt, kun käytetään  
DC-jakelua AC-jakelun sijasta ja vältetään näin AC-DC-muunnoksista aiheutuvat häviöt.  
Tutkimus osoitti myös, että DC-liitännäisiä servereitä on jo saatavissa 48 V:n jännitteelle  
ja 380 V:n servereitä voidaan rakentaa olemassa olevista komponenteista. Tämän tutki-  
muksen demonstraatio sisälsi myös energiavarastot ja laajan joukon muita tasajännit-  
teellä toimivia laitteita.

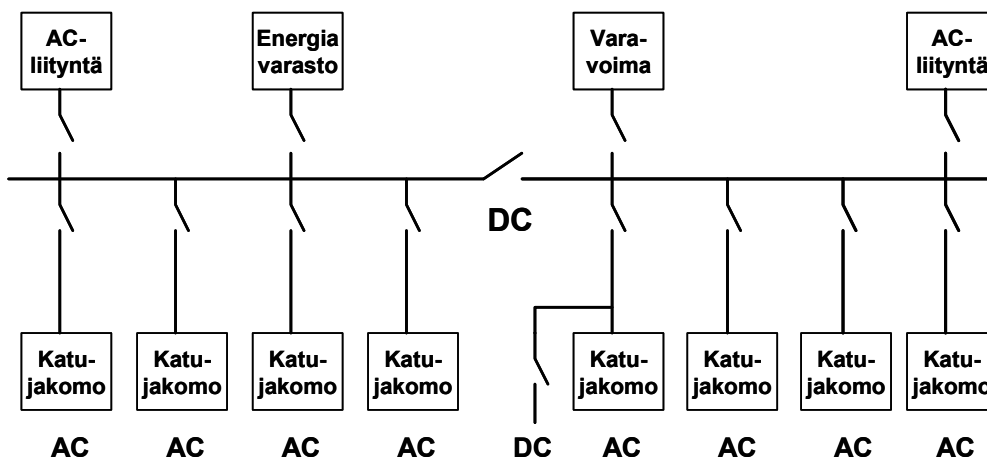
## 3.4 Pienjännite-DC-jakeluverkko

Pienjännite-DC-jakeluverkkoa voitaisiin hyödyntää pienitehoisten asiakkaiden vaativiin  
tarpeisiin. Pienjännite-DC-verkkoa syötettäisiin todennäköisesti niiltä paikoilta, joissa  
nykyisin on 20 kV / 0,4 kV -jakelumuuntajat. DC-verkon AC-liittymän tasasuuntaaja ja  
muuntaja tulisi suunnitella yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi, jolloin saataisiin toi-  
mintavarmuutta lisää ja ehkäistäisiin esimerkiksi kohdassa 5.3 mainittujen ongelmien  
syntyä.

Pienjännite-DC-verkkoja voitaisiin varmasti soveltaa myös kätevästi haja-asutusalueilla, joissa säteittäin DC-verkko mahdollistaisi pienemmät häviöt suurilla siirtoetäisyyksillä. Taajama-alueilla jakeluverkot voitaisiin rakentaa renkaiksi, jolloin redundanttisuutta saataisiin kasvatettua. DC-jakelujärjestelmä myös mahdollistaisi tehonsyötön helposti esimerkiksi kahdesta keskijänniteverkon AC-liitynnästä yhtä aikaa, koska verkkoontahdistus- ja taajuusero-ongelmat eivät olisi yhtä haastavia kuin AC-järjestelmissä.

Keskitettyjen energiavarojen käyttö olisi yksi keino pienten katkosten poistamiseen. Etenkin jännitekuopat ja oikosulut AC-jakeluverkossa eivät näkyisi loppukäyttäjillä ollenkaan. Pitempiä aikaisten katkosten hoitamiseen tarvittaisiin riittävä määrä hajautettua tuotantoa kattamaan tehontarve. Tukeutuminen saarekekäytön aikana pelkästään tuuli- ja aurinkovoimaan ilman energiavaroja ei ole suositeltavaa vaihtelevan tehontuotannon takia. Siinäkin tapauksessa, että ne eivät olisi primäärilähteitä verkossa, pitäisi säästöjä suunniteltaessa huomioida, että niiden vaihteleva teho voisi epäsuotuisassa tapauksessa häiritä muiden laitteiden säätöä ja pyrkimystä pitää DC-verkko stabiilina.

Siirryttäessä AC-verkosta DC-verkkoon pitäisi pyrkiä välttämään asiakkaille koituvia suoria lisäkustannuksia esimerkiksi uusien liityntälaitteiden muodossa. Yhtenä ratkaisuna voisi asiakkaiden liityntä verkkoon olla normaalisti AC-jännitteellä toteutettu. DC/AC-muunnin voisi olla esimerkiksi sijoitettuna keskitetysti katujakamoihin. Näin voitaisiin minimoida asiakkaille koituvat kustannukset sekä vähentää DC/AC-muuntimien käyttöä liian pienellä kuormalla, jolloin laitteiden hyötysuhde on merkittävästi nimelliskuormaa huonompi. Kun yhden laitteen takana on useita asiakkaita, on mahdollista, että laitteen kuormitus ei vaihtelisi tällöin niin merkittävästi. DC-jakelujärjestelmän suomat edut sähkön laadun kannalta eivät kärsisi tästä järjestelystä lainkaan.



Kuva 3-6. Pienjännite-DC-jakeluverkon periaatteellinen konsepti. Kuvassa on tuotu esille DC/AC-muuntimien keskittämistä katujakomokaappeihin, jolloin loppukäyttäjien kustannukset saataisiin minimoitua.

Toisaalta myös asiakkaalla tulisi olla mahdollisuus valita, haluaako hän liittyä suoraan DC-verkkoon tilanteessa, jossa hän on halukas toimimaan tuottajana verkossa. Tällöin kuitenkin kustannukset liityntälaitteesta koituisivat asiakkaalle, ja verkkoyhtiö olisi normaalisti velvollinen rakentamaan liityntäjohton tontin reunalle. Kerrostaloissa voisi olla mahdollista valita AC- ja DC-jännitteen välillä. Tällöin verkkoonliityntälaitteen kustannukset todennäköisesti koituisivat taloyhtiölle.

Pienjännite-DC-verkkoalueella asuvilla ihmisillä olisi siis mahdollisuus valita AC- ja DC-jännitteen väliltä. Lisäksi verkkoyhtiöiden tariffeissa tulisi olla määritelty erilaisia statuksia käyttäjille, kuten hyvitykset tuotetusta sähköstä tai esimerkiksi sopimuksesta kytkeytyä oman energiavaraston varaan ongelmien ilmetessä DC-verkossa. Asiakkaat, jotka tyytyvät ainoastaan AC-liityntään, saavat joka tapauksessa DC-jakelujärjestelmän tarjoamat parannukset sähkön laadussa.

### **3.5 Keskijännite-DC-jakeluverkko**

Keskijännitteisen DC-jakeluverkon potentiaalia sähkön laadun parantamiseen voitaisiin hyödyntää esimerkiksi tiheillä ydinkaupunkialueilla, joissa sijaitsee runsaasti toimistorakennuksia ja yhteiskunnan toiminnan kannalta oleellisia rakennuksia. Tyypillisten liittyjien kokoluokka DC-verkossa voisi olla välillä 1–3 MVA, riippuen liittyjien määrästä. Tällöin katkeamaton sähkön syöttö voitaisiin tarjota useille kohteille suhteellisen edullisin kustannuksin asiakkaiden sijaitessa esimerkiksi samassa korttelissa. Keskijännite-DC-verkon mahdollisia toteutustapoja on tuotu esille kohdassa 9.3.2.

Sähkøyhtiölle tällaisen järjestelmän saattaminen käyttökuntoon olisi varmasti mittava projekti ottaen huomioon, että minkäänlaisia standardeja ja turvallisuusmääräyksiä ei ole vielä olemassa. Suurten asiakkaiden kiinnostus katkeamattomaan sähkönsyöttöön tulisi olla niin suuri, että sähkøyhtiö olisi valmis investoimaan. Koska keskijännite-DC-verkolla olisi marginaalinen asiakaspotentiaali ydinkaupunkialueilla, olisi se luultavasti hyvin toimintaympäristönsä konfiguroitu kokonaisuus, jonka suunnittelu olisi täysin asiakaslähtöistä.

Kytkemällä toimistorakennukset DC-jakeluverkkoon voidaan saavuttaa sähkön jakelun luotettavuuden lisäksi muitakin hyötyjä. Toimistorakennuksissa suuri osa sähkön lopullisesta muodosta on DC-jännite. Erilaisten ja erikokoisten IT-laitteiden liitälaitteena voisi olla tällöin DC-katkoja, jolloin tasasuuntaajan häviöt jäisivät pois ja DC-suotokondensaattoreita voitaisiin myös pienentää. Myös valaistuksen ja lvi-asennusten toteuttaminen DC-jännitteellä olisi mahdollista jo tänä päivänä saatavilla olevilla laitteilla, ja DC-verkkojen yleistyessä saatavissa olevien DC-liitälaitteiden määrä kasvaisi nopeasti. Joidenkin tutkimusten mukaan toimistorakennusten sähkönjakelun toteuttaminen DC-jännitteellä mahdollistaisi jopa 20 %:n energiasäästöt vuosittain. [61]

Syötettäessä tehoa keskijännitteellä DC-verkon jännite voisi olla pienempi suhteessa nykyisin tarvittavaan AC-jännitteen tehollisarvoon. Tämä olisi mahdollista käytettäessä jo olemassa olevia kaapeleita. Tehoa voitaisiin siirtää joko 3- tai 4- johdinmallilla. 3-johdinmallissa on käytössä positiivinen ja negatiivinen napa sekä nollajohdin. 4-johdinmallissa ei ole nollajohdinta, vaan navat on kytketty rinnan siten, että tehoa voidaan periaatteessa siirtää perinteiseen kolmivaihejärjestelmään nähden kaksinkertainen määrä jännitteiden ja kaapeleiden ollessa samat. 3-johdinmallin tehonsiirtokyky on vastaavasti 1,3-kertainen perinteiseen kolmivaihejärjestelmään verrattuna. [74]

## **3.6 DC-mikroverkko**

### **3.6.1 Yleistä**

Mikroverkkojen yleisenä ideana on nostaa sähkönlaatua loppukäyttäjillä. Koko sähkönjakeluverkko voitaisiin muodostaa useista mikroverkoista, jolloin vikojen sattuessa mikroverkot toimisivat itsenäisinä verkkoina. Mikroverkon toteuttaminen AC-mikroverkkona voi olla hankalaa, koska hajautetun tuotannon tahdistaminen verkkoon voi olla vaikeaa. DC-mikroverkoissa laitteiden liittäminen verkkoon olisi yksinkertaisempaa, koska ainoastaan tuotantolaitteiden jännitetasojen olisi oltava samat. Lisäksi monet mikroverkkojen toiminnan edellyttämät laitteet, kuten energiavarastot, aurinkokennot ja polttokennot, voitaisiin liittää tietyin edellytyksin suoraan DC-jännitteeseen.

Rakennettaessa DC-mikroverkot renkaiksi voitaisiin verkkoa käyttää myös segmenteittäin. Vikaantuneiden johto-osuuksien poiskytkentä verkosta ei välttämättä häiritsisi muun verkon toimintaa lainkaan. Tehtäessä muutoksia verkon olotilaan tulee ottaa huomioon verkon stabiilisuusominaisuuksien muutos. Tilanne on verrattavissa AC-verkon maakapasitanssien muutokseen, joka aiheutuu verkon galvaanisen pituuden muutoksesta. DC-jännitteellä toteutetun mikroverkon johto-osuuksien poiskytkentä olisi todennäköisesti yksinkertaisempaa toteuttaa ja hallita kuin AC-mikroverkko samassa tilanteessa.

DC-mikroverkkojen määrän kasvaessa perinteisessä kanta- ja jakeluverkoissa voisi ongelmaksi muodostua liiallisten yliaaltojen esiintyminen. Tämän vuoksi olisi yliaaltojen suodattaminen DC-mikroverkkoja syöttävien suuntaajien läheisyydessä erittäin tärkeää, jottei yliaalloista aiheutuisi tulevaisuudessa haittaa muun verkon komponenteille ja toiminnalle.

### 3.6.2 Osa-alueisiin jakautuva DC-mikroverkko

Osa-alueisiin jakautuvalla DC-mikroverkolla voitaisiin saavuttaa parempi paikallinen järjestelmän stabiilisuus ja hallinta. DC-mikroverkossa sijaitsevan hajautetun tuotannon organisointi ja säätö olisi todennäköisesti yksinkertaisempaa, jos pääsyötön puuttuessa DC-jakeluverkko jakaantuisi pienempiin osakokonaisuuksiin. Etenkin palaaminen vian jälkeen normaaliin tilaan olisi järjestelmän kannalta joustavampaa, mikäli eri osa-alueita voitaisiin kytkeä pääsyöttöön portaittain.

Osa-alueisiin jakautuvalla DC-mikroverkolla tulisi täten olla alueellisesti keskitettyjä energiavarastoja ja varavoimaloita. Lisäksi tarvittaisiin alueelliset operaattorit järjestelmän hallintaan pidempiaikaisten vikojen ajaksi. Operaattorin tehtäviin kuuluisi kommunikointi ylemmän tason järjestelmäoperaattoreiden kanssa. Asiaa on enemmän käsitelty kohdassa 7.3.

Myös eri alueiden välisten yhdysjohtojen asentaminen voisi olla merkittävää sähkön laadun kannalta. DC-jakeluverkon jakautuessa osiin voitaisiin joidenkin alueiden riittämätön paikallinen tuotanto korvata hetkellisesti ottamalla tehoa niiltä alueilta, joissa on tuotannon ylikapasiteettia. Yhdysjohtojen rakentamisen taloudellinen kannattavuus tulisi kuitenkin laskea tarkkaan. Lähtökohtana yhdysjohtoihin investoimiselle voisi olla alueella sijaitsevien asiakkaiden vaatimustasot sähkön laadulle.

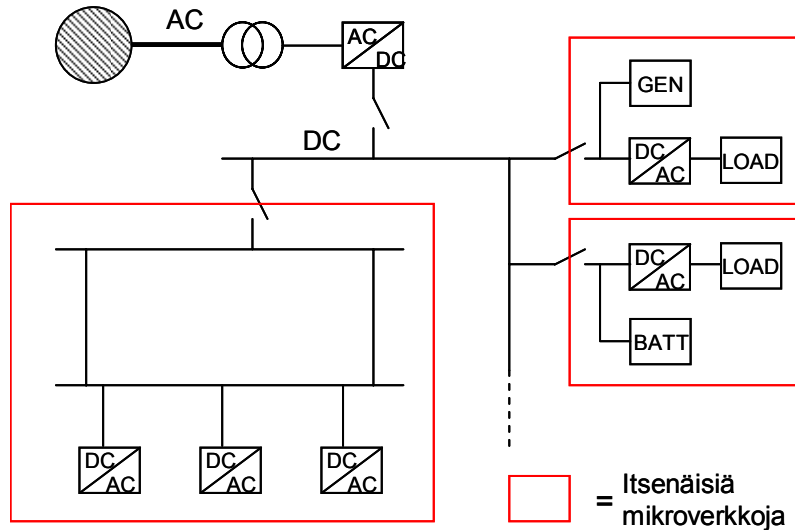
### 3.6.3 Yksittäisen käyttäjän DC-mikroverkko

Yksittäisen käyttäjän DC-mikroverkko voidaan käsittää sijaitsevan ainoastaan käyttäjän välittömässä läheisyydessä. Toisin sanoen esimerkiksi koko omakotitalon sähköistyksen käsittävä DC-mikroverkko, joka sisältää käyttäjän oman energiavaraston ja/tai energiantuotantolaitteiston sekä verkkoonliityntälaitteiston. Omakotitalon sähköistys on myös mahdollista toteuttaa lähes kokonaan DC-jännitteellä, mikäli esimerkiksi käyttäjällä on omaa hajautettua tuotantoa, kuten tuuli- tai aurinkovoimaa, jolloin laitteistojen integrointi helpottuu.

Koko jakeluverkon ollessa DC-mikroverkkona yksittäisen käyttäjän DC-mikroverkko näkyy verkossa normaalina kuormana. Vikatapauksien varalta voitaisiin verkkoyhtiön kanssa sopia asiakkaan mahdollisuudesta kytkeytyä irti verkosta oman energiavaraston ja varavoiman varaan. Vian sattuessa asiakas voisi saada korvausta verkkoyhtiöltä tämän helpottaessa vianaikaista jännitteen ylläpitoa DC-mikroverkossa.

DC-mikroverkko rakennuksen sisäisenä ratkaisuna on kuitenkin lähinnä järkevää koh-teissa, joissa suuri osa sähköenergiasta kulutetaan lopulta DC-jännitteenä ja tarvitaan

hyvin varmennettua sähköä. Hyviä esimerkkejä ovat suuret toimistorakennukset ja sairaalat, joissa kummassakin sähkön laadulle on usein asetettu korkeat vaatimukset.



Kuva 3-7. Kuvassa on havainnollistettu DC-mikroverkon eri osien mahdollisuutta toimia itsenäisinä mikroverkkoina.

### 3.7 Yhteenveto

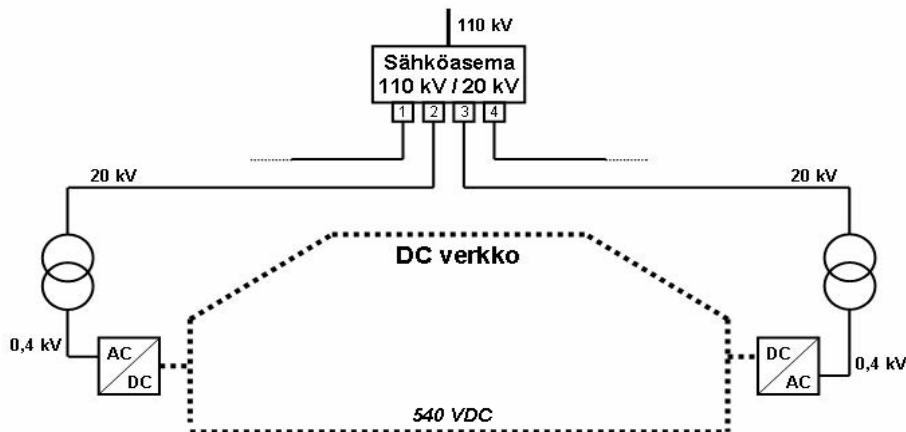
Luvussa käytiin läpi DC-jakeluverkkojen rakennemahdollisuuksia: jännitetasoja, maadoitusta ja verkkotasoja ja -topologiaa. Pohdittiin myös tasajänniteverkkojen soveltuvuutta eri käyttökohteisiin. Pääasiallisena hyötynä DC-jakeluverkot tarjoavat paremmat mahdollisuudet hajautetun energiantuotannon ja energiavarastojen implementoinnille jakelujärjestelmään. Niiden avulla sähkön laadun parantaminen loppukäyttäjillä helpottuisi huomattavasti.

Todennäköisin topologia DC-jakeluverkkojen toteuttamiselle olisi paljon keskustelun alla olevat mikroverkot. DC-jakeluverkot voitaisiin muodostaa monista rinnakkaisista DC-mikroverkoista, jolloin myös energian hallinnan integroiminen jakelujärjestelmään voitaisiin todennäköisesti toteuttaa selkeämmin. DC-mikroverkkoja voidaan muodostaa monen kokoisia ja ne voivat olla myös sisäkkäisiä, jolloin järjestelmän redundanttisuus kasvaa entisestään. Kappaleessa tuotiin esille erikokoisten DC-mikroverkkojen ominaispiirteitä ja sovelluskohteita. Esille tuodut ajatukset ovat kuitenkin suuntaa antavia ja ne lähinnä voidaankin ajatella DC-jakelujärjestelmän rakennusosiksi. Todellisuudessa kaikille alueille ja niiden tarpeille tulisi kehittää omat niille parhaiten sopivat konfiguraatiot.

## 4. Taajaman tasajännitejako- verkon komponentit

### 4.1 Päämuuntaja

Itsenäistä tasajännitejako-  
verkkoa voitaisiin syöttää jo olemassa olevilla muuntajarat-  
kaisuilla. Syöttöjännite vaihto- ja tasajännitteen rajapinnassa voisi olla 0,4 kV tai 1 kV  
laitteistosta riippuen. Jos käytettäisiin perinteistä 20 kV/0,4 kV -jakelumuuntajaa,  
0,4 kV -vaihtojännite nousisi perinteisessä tasasuuntaajassa 540 V:iin tasajännitettä. Jo  
käytössä olevien muuntajien käyttö olisi edullista, ja tuttu tekniikka tarjoaisi etua suun-  
nittelussa. Tasajänniteverkon redundanttisuuden lisäämiseksi sitä voitaisiin syöttää kah-  
della eri muuntajalla verkon eri osista, mutta ei kuitenkaan samanaikaisesti. Redundant-  
tisuuden aikaansaamiseksi syöttöjen tulisi olla eri katkaisijoiden takana. Tämä ei kui-  
tenkaan poistaisi mahdollisuutta, että syötöt sijaitisivat samalla 110 kV/20 kV -sähkö-  
asemalla.



Kuva 4-1. Tasajännitejako-  
verkon syöttölinja kahdella eri keskijännitelähdöllä 110 kV  
-sähköasemalta.

### 4.2 Suuntaajat

#### 4.2.1 Yleistä

Yleisesti ottaen puhuttaessa suuntaajista tarkoitetaan laitteita, joilla voidaan muuntaa  
vaihtojännitettä tasajännitteeksi tai päinvastoin. Tässä työssä invertteristä käytetään ni-  
mitystä vaihtosuuntaaja, jolloin tehonvirtaus voi olla kaksisuuntainen. Lisäksi voidaan  
käyttää nimitystä DC/AC-suuntaaja, jolloin tehon virtaussuunta on DC-verkosta AC-  
verkkoon.



Varsinainen tasasuuntaaja on yleensä yksisuuntainen, mutta taajuusmuuttajissa käytävillä syöttökonverttereilla voidaan myös ottaa tehoa DC-puolelta, jolloin esimerkiksi verkkoon jarruttaminen on mahdollista. Tässä sovelluksessa voidaan tarvita sekä kaksisuuntaisia suuntaajia. Suuntaajien tyyppi riippuu kunkin asiakkaan tarpeista. Luonnollisesti kalliimpaa ja monimutkaisempaa kaksisuuntaista suuntaajaa ei kannattaisi hankkia, mikäli tarkoituksena ei ole toimia tuottajana verkossa. Jotta DC-verkko soveltuisi joustavasti hajautetun tuotannon tarpeisiin, tulisi etenkin sen pääsyötön olla kaksisuuntainen.

#### 4.2.2 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaaja toimii tasajänniteverkon peruskomponenttina syötettäessä tehoa DC-verkkoon. Tasasuuntaaja voi olla toteutettu joko diodi-, IGBT- tai tyristorisillalla. IGBT-sillan (tai tyristorisillan) omaavalla tasasuuntaajalla voidaan syöttää tehoa myös DC-verkosta pois päin. Diodisilta on kuitenkin huomattavasti halvempi ratkaisu niille käyttökohteille, joille riittää ainoastaan yhdensuuntainen tehonsyöttö.

Tasasuuntaajat mahdollistavat niiden takana olevien laitteiden roolin ohjauksen DC-verkossa. Ohjauksen toteutuksesta lisää luvussa 6. Kuormien tai lähteiden ollessa kolmivaihetasasuuntaussillan avulla syötettyjä on pääjännitteen arvo verrannollinen tasajännitteeseen kaavan (10) mukaan.

$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{pää} \approx 1,35 * U_{pää} \quad (10)$$

$U_{DC}$  on tasajännitejakeluverkon nimellisjännite

$U_{pää}$  on tasasuuntaajan takana olevan kolmivaiheisen lähteen pääjännite.

Kaava (10) tuo esille suuntaajien tyypillisen jännitesuhteen vaihto- ja tasajännitepuolien välillä. Tässä työssä vaihtojännitepuolen ollessa 10 kV saadaan nimellistasajännitteeksi 13,5 kV. Jännite on riittävän suuri työssä tutkittavan konseptin tehovaatimuksille.

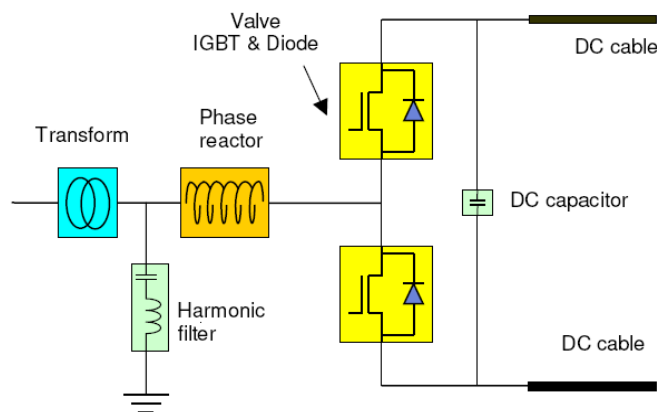
DC-jakelusovelluksiin käytettävien tasasuuntaajien tulisi olla hyvin säätöviä, ja niihin olisi myös mahdollista integroida lisäominaisuuksia tai liittää lisää esimerkiksi tuotantokapasiteettia tarpeen vaatiessa.

### 4.2.3 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja toimii tasajänniteverkossa peruskomponenttina syöttäessä tehoa DC-verkosta vaihtojännitettä tarvitseville kuormille. Vaihtosuuntaaja on järkevää toteuttaa IGBT-sillalla ottaen huomioon tasajännitejakeluverkon teholuokka ja kustannukset. Vaihtosuuntaajayksikköön integroitaisiin vastaavasti katkaisija ja ohjaus sen syöttämälle kuormalle.

Yksikössä tulisi olla mahdollisuus priorisoida esimerkiksi omakotitalon kulutuskohteet, jolloin laite voisi tehopulan aikana kytkeä vähemmän tärkeitä kuormia pois käytöstä jännitteen laskiessa DC-verkossa dramaattisesti. Kyseisiä laitteita kehitetään ja tutkitaan ainakin hollantilaisessa tutkimuskeskuksessa nimeltä ECN. ECN:n testikohteena olevaan taloon on asennettu integroitu energiavaraston, aurinkokennon ja Stirling-koneen yhdistelmälaite, jossa kuormia ohjataan aktiivisesti. Pääasiallisesti laite on tarkoitettu perinteisessä vaihtojännitejakeluverkossa käytettäväksi, mutta olisi tietenkin sovellettavissa myös tasajännitteellä. [42]

DC-kaupunkiverkon ratkaisuksi soveltuvaan ABB:n ”City Center Infeed” HVDC Light® -järjestelmään kuuluu IGBT-pohjainen VSC-konvertteri, joka on tarkoitettu taajama-alueiden liitännään myös keskijännitteellä 10 kV:n järjestelmistä alkaen.



Kuva 4-2. HVDC Light® -konsepti [43].

### 4.3 DC/DC-katkoja

DC/DC-katkoja toimii tasajänniteverkossa liityntärajapintana tasajännitteellä toimiville kuormille ja lähteille. Sillä voidaan nostaa tai laskea jännite haluttuun arvoon DC-verkon nimellisjännitteestä. DC/DC-katkojan tehtävänä on myös toimia ohjattavana liityntänä. Esimerkiksi energiavarastojen lataus- ja purkaussäätö toteutetaan ohjaamalla kyseistä DC/DC-katkojaa.

DC/DC-katkojat soveltuvat käytettäväksi erittäin hyvin juuri energiavarastojen yhteyteen. Energiavaraston purkautuessa katkojan jännite laskee. Jotta energiavarasto voisi toimia jännitettä stabiloivana tai tehopiikkejä kompensoivana elementtinä DC-verkossa, tulee sen antaa tasaista jännitettä. DC/DC-katkojalla voidaan reguloida energiavaraston ulostulojännite tiettyyn arvoon.

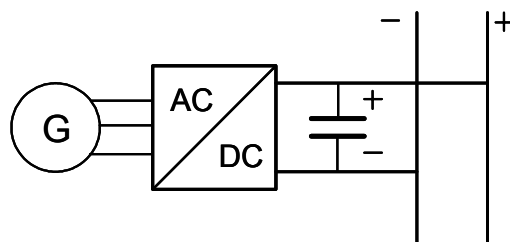
DC/DC-katkotien ongelmaksi voi muodostua niiden hyötysuhde. Nykyisin hyvien DC/DC- katkojen hyötysuhde on keskimäärin noin 90 %. Jos hyötysuhde on pienempi, häviöiden aiheuttamat kustannukset voivat kasvaa suuremmiksi kuin alkuinvestoinneissa säästetty summa kalliimpaan ja laadukkaampaan laitteeseen nähden. [44]

## 4.4 Kondensaattorit, suodattimet

Erityyppisten suodattimien avulla voidaan suuntaajien sekä AC- että DC-verkkoon päin tuottamat yliaallot suodattaa pois ja toisaalta niillä tuotetaan suuntaajien tarvitsemää loistehoa ja voidaan tasoittaa jännitevaihteluja. Syöttökonvertterin AC-puolella suodattimen tehtävänä on suodattaa konvertterin vaihtovirtaverkkoon verkkoon syöttämät harmoniset yliaallot pois ja syöttää loistehoa. Tasasähkösuodatin on tarpeen, jos yhteys on avojohtoa. Suodattimet koostuvat kondensaattoreista, kuristimista ja vastuksista. DC-jakelun yhteydessä voidaan käyttää sekä passiivi- että aktiivisuotimia.

### Kondensaattorit

Tasasuuntaajien tasajännitepuolelle voidaan kytkeä kondensaattori. Kondensaattoreiden on järkevää olla suuntaajakohtaisia, koska tällöin DC-verkossa on aina riittävä määrä kondensaattoreita kytkettynä verkkoonliittyvien määrän muuttuessa. Lisäksi tasasuuntaajien tasajännitepuoli on jänniteohjattu, minkä vuoksi verkon jännitteen tulisi olla suhteellisen stabiili. Jokainen jännitteensäätöön osallistuva tasasuuntaajasyöttö mittaa kondensaattorin yli olevaa jännitettä, joka on sama kuin tasajännitekiskon jännite. Kondensaattoreiden tarkoitus tasajänniteverkossa on suodattaa ja stabiloida häiriöitä tasajännitepuolella. Ne kytketään syöttävien napojen väliin (Kuva 4-3). Kondensaattori ehkäisee vaihtojännitepuolelta välittyvien häiriöiden näkymistä tasajännitteessä. [30]



Kuva 4-3. Suodatuskondensaattorin käyttö tasasuuntaajan kytkennässä DC-kiskoon.

Tasajänniteverkon ongelmaksi voi muodostua verkossa esiintyvät jännite-erot laitteiden liityntäpisteiden välillä. Jännite-erot synnyttävät verkkoon laitteiden kesken kiertävää virtaa. Tästä syystä kytkettävien laitteiden ekvivalenttisten sisäänmenoimpedanssien suuruuksien tulisi olla samat.

Suodatuskondensaattorit mitoitetaan suuntaajien ominaisuuksien perusteella. Kondensaattorin koot kaikille suuntaajille voidaan laskea käyttäen kaavaa (11). [28], [31]

$$C_{dc,suuntaaja} = \frac{P_n}{V_{dc,ref}^2} \cdot \frac{2\xi_n^2}{\omega_{lp}} \cdot \frac{1}{(1-\delta_n)\delta_n} \left[ \frac{\mu F}{kW} \right] \quad (11)$$

$P_n$  on suuntaajan nimellisteho

$V_{dc,ref}$  on referenssijännite

$\omega_{lp}$  on vaihtojännitepuolen alipäästösuotimen katkotaajuus

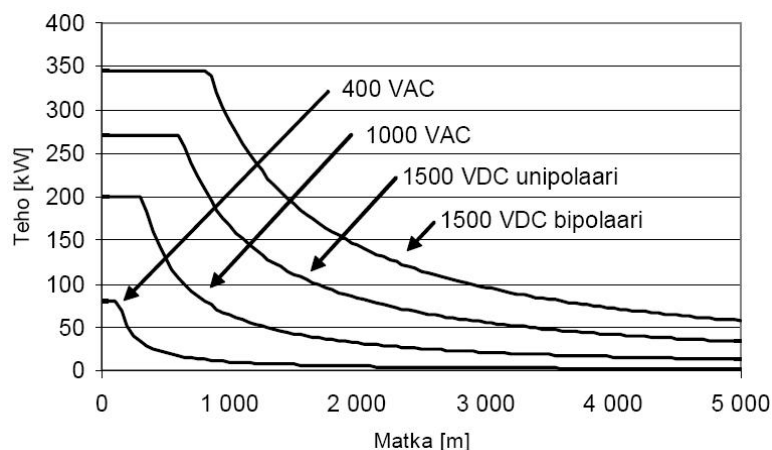
$\xi_n$  on vaimennuskerroin

$\delta_n$  on suuntaajan suhteellinen jännitteenalenema nimelliskuormalla.

Maadoituskondensaattoreiden tarkoituksena on kasvattaa maasulkuvirtojen aikavakiota siten, että niiden havaitseminen helpottuu. Maadoituskondensaattoreiden kokoon ei vaikuta suuntaajan nimellisteho tai jännite. Ne mitoitetaan käytettävän kaapelin ominaisuuksien perusteella, koska maasulkuvirran suuruus riippuu myös kaapelin ominaisuuksista. [32]

## 4.5 Kaapelit

Tasajännitejakeluun voidaan periaatteessa käyttää vaihtojännitteelle tarkoitettuja kaapeleita. Jännite- ja virtakestoisuuksiin tulee kuitenkin kiinnittää huomiota, koska valmistajien vaihtojännitteelle ilmoittamat arvot eivät välttämättä pidä paikkaansa tasajännitteellä. Huomion kohteena on etenkin jännite-eristys. Oletettavasti saataisiin käyttöön suurempi siirtokapasiteetti johdinyksikköä kohden (Kuva 4-4).



Kuva 4-4. Vaihto- ja tasajännitteen siirtoetäisyys tehon funktiona samassa johtimessa 6 %:n jännitteenalennemalla. [35]

Tasajännitteellä voidaan käyttää esim. AHXCMK-WTC- ja HXCMK-WTC-tyyppisiä yksijohdinkaapeleita, joissa vaihejohdin on alumiinia. Kaapeleita Suomessa toimittaa ainakin Prysmian Cables & Systems (ent. Pirelli Cables) [66]. ABB:n HVDC Light®-konseptiin kuuluu öljytön maakaapeli, joka on tarkoitettu tasajänniteverkon sähköistämiseen. (Kuva 4-5). Kaapelia on saatavissa 80 kV, 150 kV ja 300 kV:n versiona 95 mm<sup>2</sup>:stä 3 000 mm<sup>2</sup>:iin. Kaapelia on käytetty myös 10 kV:n järjestelmätoteutuksissa [36].

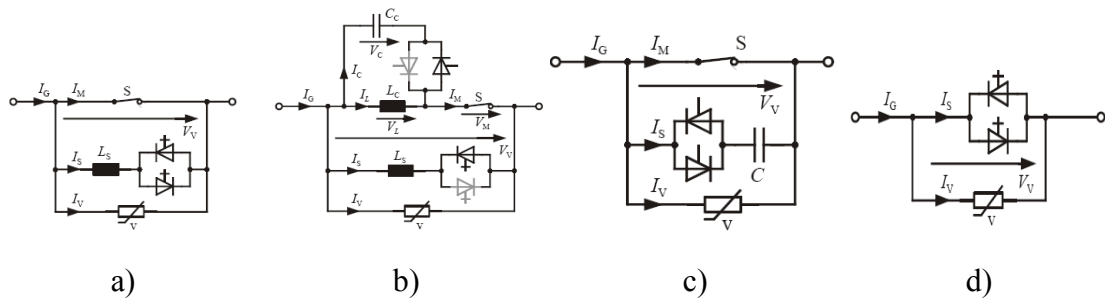


Kuva 4-5. HVDC Light®-konseptin maakaapeli ja sen asennusta [36].

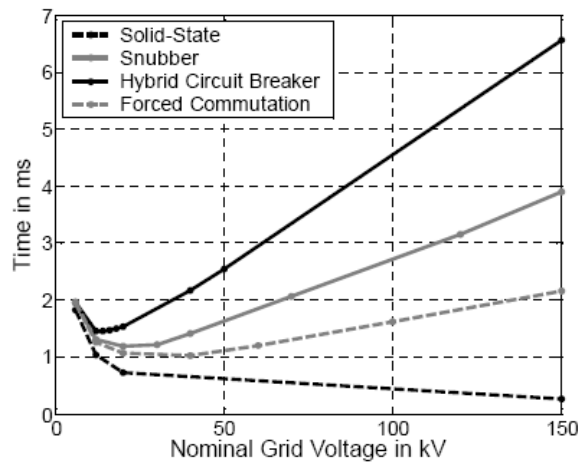
## 4.6 Katkaisijat

Tasavirran katkaisu on vaikeampaa kuin vaihtovirran. Tämä johtuu siitä, että elektronien virta katkaisijan elektrodien läpi on jatkuva tasavirralla. Avausvälin tulee olla riittävä, jotta ilmassa kulkeva elektronivirta eli valokaari saadaan sammumaan. Vaihtovirralla (50 Hz) on joka jaksolla kaksi nollakohtaa, jossa se sammuu itsestään. Vaihtovirralla suunnitellut katkaisijat voivat pystyä katkaisemaan ainoastaan osan nimellisvirrastaan tasavirralla. Tämä on kuitenkin hyvin tapauskohtaista.

Nopeasti toimiva puolijohdekatkaisija on avainasemassa mm. autonomiseen toimintaan pystyvän mikroverkon vikojen hallinnassa. Nopea ja luotettava katkaisutoiminta on myös tasajännitteverkon katkaisijan tärkein ominaisuus. DC-jännitteelle sopivia katkaisijatyyppejä voi olla esim. perinteinen hybridityyppi, pakkokommutoinilla varustettu hybridikatkaisija, snubberipiirillä varustettu mekaaninen katkaisija ja elektroninen katkaisija (Kuva 4-6). Näistä mekaaninen katkaisija, jossa on hyvin suunniteltu snubberipiiri, sopii ja on kustannustehokkain keskijännitepiireille ja täysin elektroninen katkaisija sopii suuremmille jännitteille. Täysin elektroninen katkaisija on näistä katkaisijatyypeistä nopein kaikilla jännitteillä (Kuva 4-7). [70]



Kuva 4-6. Keskijännitteelle soveltuvia katkaisijatyyppejä: a) hybridikatkaisija, b) pakkokommutoinnilla varustettu hybridi, c) snubberipiirillä varustettu mekaaninen ja d) elektroninen katkaisija. [70]



Kuva 4-7. Katkaisijoiden toiminta-aikoja eri jännitteillä. [70]

DC-jakeluverkon katkaisijoiden tulisi olla melko pieniä ja suhteellisen halpoja, etenkin integroitaessa niitä asiakkaille tarjottaviin vaihtosuuntaajakeskuksiin ja mahdollisiin verkkoonliityntälaitteisiin. Tähän soveltuvia laitteita ovat ns. kompaktikatkaisijat, joiden katkaisukyky on riittävä DC-verkossa esiintyville virroille. Tarvittaessa lisää katkaisukykyä voidaan käyttää moninapaisia katkaisijoita siten, että kytetään useampi napa sarjaan, jolloin saadaan kasvatettua avausvälin suuruutta riittävästi.

Tällä hetkellä kompaktikatkaisijoita tasajännitteelle löytyy noin 750 V:iin asti. Esimerkiksi ABB Oy:llä on tarjota katkaisukyvyltään ja kooltaan suhteellisen tehokkaita kompaktikatkaisijoita. Valikoiman suurimmalla tasajännitteelle soveltuvalla koteloidulla kompaktikatkaisijalla SACE Isomax S6:lla voidaan katkaista 50 kA:n oikosulkuvirta 750 V:n jännitteellä. Kompaktikatkaisijan nimellisvirta on 800 A käytettäessä sitä neljänänapaisena (leveys 280 mm, korkeus 268 mm, syvyys 103 mm). [37]



*Kuva 4-8. GE:n GERapid-sarjan DC-katkaisija. Kuvassa ylhäällä punaiset kipinäsammutuskammiot, alhaalla musta pyöreä solenoidivetokoneisto ja sen päällä ohjainpiirin liitännät. [40]*

Lisäksi löytyy myös katkaisijoita suuremmille tasajännitteille, jotka on tarkoitettu lähinnä rautatiejärjestelmiin ja teollisuuskäyttöön. Näihin katkaisijoihin liittyviä vaatimuksia määritellään standardissa IEC 61992-1. Tällaisista katkaisijoista esim. GE:n GERapid 6007 -sarjan katkaisijoiden nimellisjännite on 3 600 V ja nimellisvirta 6 000 A (leveys 270 mm, korkeus 863 mm, syvyys 821 mm). Katkaisijat ovat yksinapaisia. Valmistaja ei ilmoita 3 600 V:n katkaisijan oikosulkuvirranksatkaisukykyä. Sen sijaan taulukoissa on ilmoitettu 3 000 V:n katkaisijan kykenevän 50 kA:n oikosulkuvirran katkaisuun. [38], [40]

[FKI Switchgear](#) tekee MM74 nopeita DC-katkaisijoita 300–3 200 V ja 2 000–6 000 A. Powell tekee DC-katkaisijoita 800–1 600 V ja 4 000–8 000 A. 10–20 kV:n jännitealue on katkaisijoissa huonosti edustettuna, sillä esim. uusien DC-katkaisijoiden kehitys on keskittynyt lähinnä HVDC-sovelluksiin, joissa on pääsääntöisesti käytössä 10-kertaisia DC-jännitteistä keskijännitejakeluun nähden. Esimerkiksi USA:ssa on ABB:n toimittamassa kokeiltu 500 kV:n DC-katkaisijoita 2 000 A:n nimellisvirralla menestyksekkäästi. Luonnollisesti näiden katkaisijoiden toimintanopeus ei ole keskijännite-DC-verkkoon riittävä. [39]

## 4.7 Tuotantoyksiköt

Tasajännitejakeluverkossa voidaan toteuttaa myös hajautettua energiantuotantoa. Hajautetun tuotannon kokoluokka käsitetään välille 1 kW–1 000 kW. Käytettäessä tasasuuntaajia voidaan hyödyntää tuotantoyksiköinä perinteisiä generaattoreita ja turbiineja. Pientai keskijännitteeseen liitettävän tuulivoiman yhteydessä tasajännitejakeluverkolla voisi olla etuja, sillä mm. energiavaraston liittäminen sen yhteyteen helpottuu. Lisäksi erilaiset tasajännitettä tuottavat yksiköt ovat tulevaisuudessa varteenotettavia lisäenergian lähteitä. Tasajännitettä tuottavat polttokennot ja aurinkopaneelit soveltuvat hyvin sijoitettaviksi asuinrakennusten läheisyyteen, koska ne ovat luonteeltaan pienempitehoisia kuin esimerkiksi suuret generaattoriyksiköt. Myös niiden hankintahinta on rajoittava tekijä tehon suuruudelle, ainakin vielä lähitulevaisuudessa.

Tässä työssä pyritään käsittelemään etenkin tasajännitejakeluverkon ominaisuuksia, etuja ja soveltuvuutta taajaman sähkön jakeluun. Vaikka hajautetun tuotannon liittyessä läheisesti verkotoimintaan ja aiheeseen, ei varsinaisten tuotantoyksiköiden yksilöllisiä ominaisuuksia tasajännitejakeluverkossa käsitellä tarkemmin, ellei se ole kokonaisuuden kannalta erittäin oleellista. Eri tuotantoyksiköiden soveltuvuutta jänniteohjattuun tasajänniteverkkoon tulisi tutkia, etenkin niiden ohjattavuuden kannalta. Tasajänniteverkon jännitteen ylläpitäminen on ensisijaisen tärkeää, jolloin myös tuotantoyksiköiden kuormanjaon on toimittava ja reagoitava nopeasti muuttuviin kuormitustilanteisiin.



## 5. Tasajänniteverkon suojaus ja vianhallinta

### 5.1 Yleistä

Tasajänniteverkon suojaus edellyttää etenkin maasulkujen, oikosulkujen, yli- ja alijännitetilanteiden ja ylikuorman (ylivirta) hallintaa. Tasavirtajärjestelmässä DC-vian hallinta edellyttää suojauskonseptia, jonka päätoimintoihin kuuluu [75]:

1. nopea ja luotettava vian havaitseminen
2. katkaisijoiden ja suuntaajien ohjaus (IGBT-lukitus)
3. vikaantuneen DC-verkon paikallistaminen
4. vian tyyppin tarkastus (hetkellinen, poistunut tai pysyvä)
5. vikaantuneen DC-verkonosan erottaminen muusta järjestelmästä (pysyvä vika)
6. (muun) verkon palauttamien normaalitilaan.

DC-vikavirtojen hallintaan on ehdotettu mm. seuraavia menetelmiä [75]: 1) AC-katkaisija syötön vaihtovirtapuolelle, 2) IGBT-katkaisijat jokaisen suuntaajan yhteyteen ja 3) IGBT-katkaisijat suojaamaan kutakin DC-verkon haaraa. Vian hallinta edellyttää joka tapauksessa jännite- ja virtamittauksia DC-jakelun eri osa-alueilla. Vaihtovirtaverkosta tasavirtaverkon puolelle siirtymään pyrkivät nopeat jännitteenvaihtelut voidaan tyypillisesti estää tasajänniteverkon syötössä olevan AC/DC-muuntimen nopean DC-jännitteen säädön avulla. Kuten vaihtojänniteverkossa myös tasajänniteverkossa voi esiintyä jännitekuoppia, jännitteen vaihtelua ja lyhyitä katkoksia. Tyypillisesti kuitenkin tasajänniteverkon konvertterien välipiirin kondensaattorit voivat puskuroida lyhyitä jännitekuoppia ja katkoksia. Tasajännitepiiriin liitettyjen energiavarastojen avulla taas voidaan hallita pitempiä kuoppia ja katkoksia. Tasajänniteverkon ollessa mikroverkkotyyppinen (microgrid) tulee suojauksessa huomioida myös saareketilanne (autonominen verkkotoiminta) ja saarekkeeseen siirtymiseen ja poistumiseen liittyvien tilanteiden hallinta.

### 5.2 Jännitteen laatu

DC-jakeluverkon jännitteen laadulle ei ole olemassa mitään varsinaista standardia tai määritelmää vaikkakin esim. EN 61000-4-16 koskee myös tasajännitepiirien häiriöitä. Tasajännitteen laadulle tulisi siis tulevaisuudessa asettaa selkeät rajat ja standardit. Etenkin eri taajuisten jännitevaihteluiden vaikutusten tutkiminen DC-verkossa olisi suotavaa. DC-verkossa tapahtuvien kytkentätilanteiden ja niistä aiheutuvien tehonvaihteluiden vuoksi DC-verkon jännite voi vaihdella välillä runsaastikin. Toisaalta DC-verkossa ei ole muuta indikaattoria tehotarpeelle kuin jännitetaso. Joidenkin lähteiden mukaan jännitteen tulisi pysyä välillä  $\pm 5\%$ . [30], [50]

DC-verkon jännitteessä esiintyvä aaltoisuus (”ripple” – jäännösaallot) tulee ottaa huomioon suunniteltaessa verkkoa. Sykkeisyys johtuu tasasuuntauksesta, joka muodostaa epätäydellistä tasajännitettä. Tasajännitteessä esiintyy eritaajuisia pieniamplitudisia jännitevaihteluita, joiden suuruus riippuu mm. käytetyistä suodattimista ja suuntaajan tyypistä. DC-verkon napojen väliin kytketyt suuret kondensaattorit pyrkivät estämään jännitteen muutoksia, jolloin jännite tasoittuu. Myös sarjainduktansseja voidaan käyttää virran stabiloimiseen, jolloin sen aiheuttamat muutokset jännitteeseen verkon impedanssin kautta eivät ole suuria. Parhaisiin tuloksiin päästää kondensaattorin ja induktanssin kombinaatiolla. Jäännösaaltoja voidaan myös vähentää lisäämällä suuntaajaan erillinen piiri. Se koostuu ylimääräisestä kelasta ja kahdesta kytkimestä, joilla induktanssiin ladataan energiaa sopivalla hetkellä ja puretaan sitten DC-verkkoon jännitteen tasoittamiseksi. Jäännösaaltojen vaihtelua käsitellään standardissa EN 61000-4-17. [51], [52]

Koska DC-jakeluverkossa voi olla suurikin määrä suuntaajia samanaikaisesti kytkeytyneenä ja kaikki tuottavat omanlaisia jäännösaaltoja tasajännitteeseen, on mahdotonta kuvailla jännitteen lopullista muotoa. Toisaalta etuna voidaan nähdä se, että suuntaajat eivät ole tahdissa keskenään, jolloin vältytään jäännösaaltojen summautumiselta yliaaltojen tapaan, mistä kerrottiin kohdassa 2.5.3.

Tasajänniteverkon sähkönlaatua kuvaaviksi tekijöiksi on ehdotettu [52] harmonisia yliaaltoja kuvaavaa THD:tä vastaavaa, matalataajuisia sinimuotoisia häiriöitä (Low Frequency Sinusoidal Disturbance, LFSD) kuvaavaa indeksiä  $D_{LFSD}$ , joka on verrannollinen tasavirran suuruuteen.

$$D_{LFSD} = \left[ \sum_{k>0}^{k_{\max}} (Q[k]/Q[0])^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$Q[0]$  on tasapainotilan dc arvo  
 $Q[k]$  taajuusalue  $g[n]$  määrästä (rms)  
 $k$  on taajuusindeksi välillä 0 ja  $k_{\max}=F_{\max}/df$   
 $df$  on taajuusresoluutio tietylle aikaikkunalle.

Jännitteen tasapainotilan vaihteluun eli jänniterippeliin vaikuttaa mm. tasajännitettä syöttävän muuttajan tyyppi ja ohjausmenetelmä. Jänniterippeliä kuvaavaksi jäännös- $PQ$  indeksiksi on ehdotettu määritelmää [52]:

$$q_{pp,T} = \max_{n,k} \{q[n] - q[n+k+k_T]\}, \quad (13)$$

$k_T$  on näytemäärä aikavälillä  $T$ .

## 5.3 DC-komponentin kulkeutuminen AC-verkkoon

DC-komponentin kulkeutuminen AC-verkkoon ei suoranaisesti ole uhka DC-verkon stabiilisuudelle. Se kuitenkin liittyy läheisesti DC-jakeluverkkoja koskeviin näkökohtiin ja ongelmiin. Hajautetun tuotannon lisääntyessä kasvaa tehoelektroniikan määrä verkossa. AC-verkkoon syntyy yhä suurempia määriä rajapintoja AC- ja DC-verkkojen välille. Vaikka DC-komponentin vaikutukset monissa laitteissa tiedetään, esimerkiksi magneettisydänten kyllästymien, lämmön nousu, sekä moottoreissa mahdollisesti esiintyvät vääntömomentin heilahtelut. Tulevaisuudessa sen huomioon ottaminen on olennaista, koska sen esiintymisriski AC-verkossa tulee lisääntymään.

Yleisen mielipiteen mukaan AC-muuntajat eivät siirrä DC-komponenttia ensiöstä toisioon. Tämä ei kuitenkaan täysin pidä paikkaansa pitkällä aikavälillä, koska DC-vuo muodostuu integraalina DC-jännitteestä, ja etenkin, jos muuntajan hyötysuhde on erittäin korkea. Tällöin DC-komponentti voi näkyä muuntajan magnetointivirrassa. Ilmavälit kuitenkin lisäävät muuntajien sietokykyä tehoelektroniikan aiheuttamille magnetointivirroille. Lisäksi muuntajien ja suuntaajien yhteisellä suunnittelulla voidaan DC-komponentin kulkeutumista AC-verkkoon ehkäistä dynaamisesti. Tämän vuoksi ei olisi suositeltavaa kytkeä suuntaajia suoraan AC-verkkoon ilman muuntajaa.

Erityistä huomiota tulisikin kiinnittää hajautetun tuotannon mukanaan tuomien laitteiden laatuun. Huonosti suunnitellut ja yksinkertaiset suuntaajat voivat toimia suurinakin DC-virran lähteinä AC-verkossa. DC-jakeluverkkoihin käytettävien suuntaajien tulisi olla säädettäviä, jolloin ne voisivat aktiivisesti kontrolloida DC-komponentin kulkeutumista AC-puolelle. [53]

## 5.4 Maasulku tasajänniteverkossa

### 5.4.1 Maasulku DC-puolella

Alla on havainnollistettu maasulun aiheuttamaa vikavirtaa tasajänniteverkossa (Kuva 5-1). Vikavirta  $i_{vika}$  kulkee vikaresistanssin  $R_{vika}$  kautta maahan. Vian tapahtuessa keskellä kaapeliosuutta kulkee vikavirta molemmilta puolilta vikakohtaa, jota on merkitty symbolein  $i_{vika/2}$ . Vikavirta jakautuu solmupisteiden kesken  $i_{vika/2n}$  ja palaa takaisin maasta solmupisteiden maadoituskondensaattoreiden  $C_{suojaus}$  kautta. Maasulkuvirran ekvivalenttinen vikaresistanssi voidaan laskea kaavasta (12).

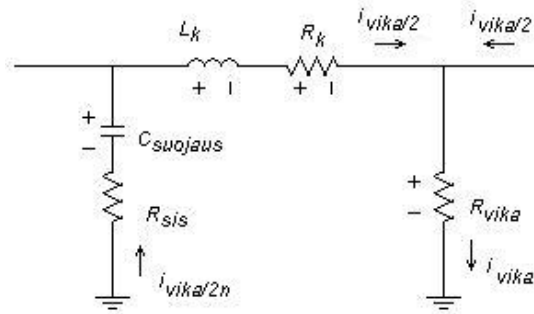
$$R_{vika,ekv} = R_{vika} + \frac{R_k}{2} + \frac{R_{sis}}{2n} \quad (14)$$

$R_{vika}$  on vikaresistanssi kaapelin navasta maahan

$R_k$  on kaapelin resistanssi

$R_{sis}$  on kondensaattorin sisäinen resistanssi

$R_{vika,ekv}$  on ekvivalenttinen kokonaisvikaresistanssi.



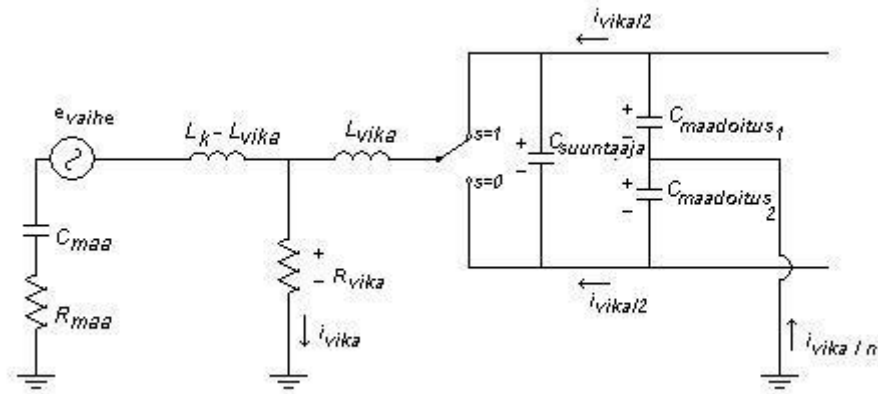
Kuva 5-1. Ekvivalenttipiiri tasajänniteverkossa esiintyvälle maasulkuvirrälle. Solmupisteitä merkitään alaindeksillä  $n$ . Muut symbolit selitetty yllä. [32]

#### 5.4.2 Maasulku AC-puolella

Vaihtojänniteverkossa tapahtuvan maasulun kuvaaminen tasajänniteverkossa on hankalaa, koska vian vaikutus DC-kiskossa johtuu sen tapahtumahetkestä. Tapahtumahetki on siksi oleellinen, koska vikavirran kulkureitti on riippuvainen suuntaajan puolijohteiden kytkentäasunnoista.

Koska AC-puolen muuntajat ja laitteet ovat maadoittamattomia tai maadoitettu suuren impedanssin kautta, suurin osa vikavirrasta pyrkii virtaamaan DC-puolen solmupisteen maadoituksen kautta ja suuntaajan läpi takaisin vikapaikkaan. Alla on esitetty AC-puolella tapahtuvan maasulun ekvivalentti vikavirtapiiri (Kuva 5-2). Suuntaajan ekvivalentti kytkentätila määrää ( $s = [0,1]$ ) virran kulkureitin. Kytkimen ollessa asennossa  $s = 1$  vikavirta kulkee kondensaattorin  $C_{maadoitus1}$ , suuntaajan ja vika-impedanssin kautta takaisin maahan. Kytkimen ollessa asennossa  $s = 0$ , vikavirta kulkee kondensaattorin  $C_{maadoitus2}$ , suuntaajan ja vika-impedanssin kautta takaisin maahan. Vika voi esiintyä esim. muuntajan käämityksien takana. Se voi myös esiintyä käämeissä sisäisesti, jolloin vikainduktanssi on välillä  $0 \leq L_{vika} \leq L_k$ .

Maasulkuvirta aiheuttaa jännitehäviön kondensaattoreissa. Kaava (15) määrittelee jännitehäviöiden jakautumisen kondensaattoreiden kesken eri kytkentätilanteissa. [32]



Kuva 5-2. Ekvivalenttipiiri suuntaajan AC-puolella tapahtuvalle maasulkuvirralle. Vikaresistanssi  $R_{vika}$ , maadoituskondensaattorit  $C_{maadoitus1}$ , ja  $C_{maadoitus2}$  suuntaajaan kondensaattori  $C_{suuntaaja}$ , vaihtojännite lähteen tai kuorman maadoitusimpedanssit  $R_{maa}$  ja  $C_{maa}$ , kaapelin induktanssi  $L_k$  ja vikainduktanssi  $L_{vika}$ , lisäksi vastaavat vikavirrat  $I_{vika}$ . Solmupisteiden lukumäärää merkitään alaindeksillä  $n$ . [32]

Suuntaajan ulostulon ja maan väliselle jännitteelle voidaan kirjoittaa looginen kaava (15) yllä olevan piirin avulla (Kuva 5-2). Merkitään suuntaajan ulostulojännitettä  $V_{ulos}$  ja maan potentiaalia  $V_{maa}$ .

$$\begin{aligned}
 V_{ulos} - V_{maa} &= s \cdot V_{C,maadoitus1} + (s-1) \cdot V_{C,maadoitus2} \\
 &= s \cdot (V_{C,maadoitus1} + V_{C,maadoitus2}) - V_{C,maadoitus2} \\
 &= s \cdot V_{C,suuntaaja} - V_{C,maadoitus2}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$V_{ulos}$  on suuntaajan ulostulojännite

$V_{maa}$  on maan potentiaali

$V_{C,suuntaaja}$  on suuntaajan kondensaattorin jännite

$V_{C,maadoitus1}$  on maadoituskondensaattorin 1 jännite

$V_{C,maadoitus2}$  on maadoituskondensaattorin 2 jännite

$s$  on suuntaajan puolijohteiden kytkentätilaa [1,0] kuvaava suure.

## 5.5 Oikosulku tasajänniteverkossa

Oikosulkuvirran laskeminen DC-verkossa on hieman ongelmallista. Tämä johtuu siitä, että hajautetun tuotannon vaikutukset oikosulkuvirtaan eivät ole yksiselitteiset. Etenkin jos DC-verkossa sijaitsee paljon verkkoon liitettyä tuotantoa tasasuuntaajien kautta. Oikosulkuvirran suuruuteen vaikuttaa pääasiassa suuntaajien sekä AC-verkon ekvivalenttinen impedanssi. Lisäksi suuruuteen vaikuttaa myös kaapelien oikosulkuimpedanssi.

Oikosulkuvirralla on ominaisarvoja, jotka kuvaavat kyseisen oikosulkuvirran käyttäytymistä ja käyrämuotoa. Niitä ovat oikosulkuvirran nousuaika, huippuarvo ja loppuarvo. Huippuarvo on riippuvainen AC- ja DC-puolien induktanssien suhteesta. Mitä pienempi AC-puolen induktanssi on, sitä vähemmän huippuarvo on riippuvainen muiden impedanssien suuruudesta. Vastaavasti loppuarvoon vaikuttaa AC- ja DC-puolien resistanssien keskinäinen suhde. Mitä pienempi AC-puolen ekvivalenttiresistanssi on, sitä enemmän saadaan rajoitettua DC-puolen oikosulkuvirran loppuarvoa. Oikosulkuvirran nousujan aikavakio on riippuvainen sekä AC- että DC-puolen resistanssien ja induktanssien suhteista. [33]

Hajautetun tuotannon vaikutukset oikosulkuvirtaan välittyvät niiden ja DC-verkon rajapinnassa olevien suuntaajien ekvivalenttisen impedanssin kautta. Oikosulkuvirran suuruus aliarvioidaan, jos suuntaajien ekvivalentit impedanssit oletetaan vakioksi. Siksi täytyykin ottaa huomioon DC-verkkoon näkyvien impedanssien muutos DC-jännitteen funktiona. Tämä on paljon aikaa vievä metodi, joka vaatii jokaisen impedanssin laskemisen erikseen jokaiselle vikapaikalle iteroimalla, mikä tarkoittaa erittäin suurta määrää matriisilaskentaa. Laskennassa pyritään määrittämään yhden iteraatiokierroksen aikana oikosulkuvirran aiheuttama jännitteenalenema ja näin myös suuntaajaan ekvivalentin impedanssin muutos. Laskenta aloitetaan alusta tulokseksi saadulla jännitteellä ja tätä jatketaan, kunnes lopetusehto on toteutettu.

Lähes yhtä hyviin tuloksiin päästään approksimaatiomenetelmällä, jossa määritellään ns. skaalauskerroin, jolla suuntaajien impedansseja skaalataan pienemmiksi riittävän suuren ja oikean oikosulkuvirran saamiseksi. Alla on esitetty kaavat, joiden avulla DC-verkon oikosulkuvirtaa voidaan approksimoida rationaalisissa rajoissa. Kaavat pätevät tasasähköverkoille, joita syötetään diodisilloilla ja joissa ei kondensaattoreita tai muita vastaavia oikosulkuvirranlähteitä. [34]

$$I_{dc1} = \frac{E_{N,suuntaaja}}{Z_{r1} + Z_{ulkoinen}} \quad (16)$$

$$I_{dc0} = \frac{E_{N,suuntaaja}}{Z_{r0} + Z_{ulkoinen}} \quad (17)$$

$I_{dc1}$  on approksimoitu oikosulkuvirta

$I_{dc0}$  on approksimoimaton oikosulkuvirta

$E_{N,suuntaaja}$  on suuntaajan nimellisjännite DC-puolella

$Z_{r1}$  on skaalattu suuntaajan ekvivalentti impedanssi

$Z_{r0}$  on skaalaamaton suuntaajan ekvivalentti impedanssi

$Z_{ulkoinen}$  on DC-verkon ulkoinen ekvivalentti impedanssi.

Yhdistämällä kaavat (16) ja (17) saadaan määriteltyä kaava (18) skaalauskerroimelle  $K_{skaalaus}$ , joka on virtojen suhde:

$$K_{skaalaus} = \frac{I_{dc1}}{I_{dc0}} = \frac{Z_{r0} + Z_{ulkoinen}}{Z_{r1} + Z_{ulkoinen}} \quad (18)$$

$Z_{r1}$  voidaan ilmaista  $Z_{r0}$  avulla, jolloin saadaan kaava (19):

$$Z_{r1} = \frac{K_{20}}{K_{21}}(1 - e_{DC})Z_{r0} \quad (19)$$

$e_{DC}$  on suuntaajan suhteellinen jännite (p.u)

$K_{20}$  on vakion  $K$  arvo jännitteen ollessa nolla ( $K_{20} = 1,02$ )

$K_{21}$  on vakion  $K$  arvo jännitteellä  $e_{DC}$ .

Jos vielä vaaditaan, että  $Z_{ulkoinen}$  ei ole vakio voidaan kirjoittaa:

$$Z_{ulkoinen} = \frac{E_{dc}}{I_{dc1}} \quad (20)$$

Näin voidaan lopulta kirjoittaa skaalauskerroimelle kaava (21), josta voidaan helposti nähdä sen yhteys oikosulkuvirtaan ja se, kuinka suuntaajan ekvivalenttiset impedanssit ovat riippuvaisia suuntaajan jännitteestä. Kaavasta (21) nähdään, että suuntaajalle, joka sijaitsee samassa segmentissä vian kanssa, on  $E_{dc} = 0$  ja  $K_{21} = 1,02$ , jolloin skaalauskerroin on yksi.

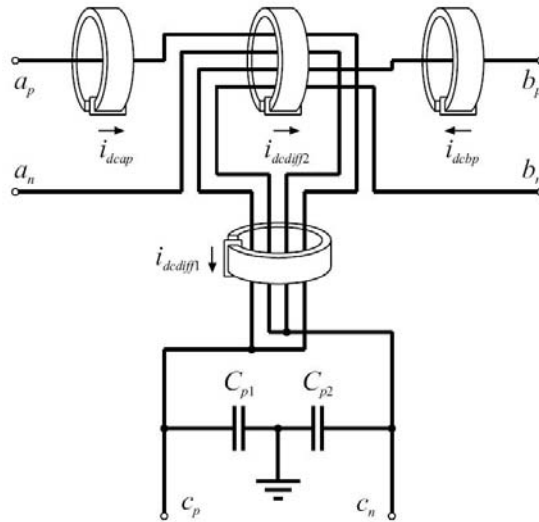
$$K_{skaalaus} = \frac{Z_{r0} + \frac{E_{dc}}{I_{dc1}}}{\frac{1,02}{K_{21}}(1 - e_{DC})Z_{r0} + \frac{E_{dc}}{I_{dc1}}} \quad (21)$$

Nyrkkisääntö DC-verkon oikosulkuvirran  $I_k$  laskemiselle on, että se lasketaan normaalisti käyttäen nimellisarvoja ja kasvatetaan saatua tulosta 15 %:lla.

Tehokas virtasuojaus edellyttää myös virran muodon tarkkailua. Esimerkiksi [76] rautateiden DC-verkossa etäällä olevan vian aiheuttama virta voi olla pienempi kuin junan käynnistysvirta. Ratkaisuna on esim. jatkuva-aikainen virranmittaus ja ylivirtasuojaus täydennettynä di/dt-delta i -suojuuksella. Jos mitattu di/dt-arvo poikkeaa asetetusta arvosta tietyn ajan, lasketaan tälle ajalle virran integraali, jota verrataan sitten laukaisun aiheuttavaan asetusarvoon.

## 5.6 Virtamuuntajaratkaisut vikavirtojen mittauksessa

DC-verkon vikavirtojen mittaaminen eroaa AC-verkon käytännöstä. Selektiivisyyden takaamiseksi joudutaan mittaamaan myös differentiaalista virtaa pelkkien napojen virtojen lisäksi. Seuraavalla sivulla on esitetty differentiaalinen mittauskytkentä maasulkuvian paikantamiseksi (Kuva 5-3).



Kuva 5-3. Eräs ehdotus mittamuuntajien käytöstä DC-verkon vikavirtojen mittaamisessa ja selektiivisyyden takaamisessa. Kuvassa  $C_{p1}$  ja  $C_{p2}$  ovat maadoituskondensaattoreita. [32]

Yllä olevassa kuvassa esitettyjen mittamuuntajien virrat määritellään seuraavasti (Kuva 5-3):

$$i_{dc\,diff\,1} = i_{dc\,cap} + i_{dc\,an} + i_{dc\,bp} + i_{dc\,bn} \quad (22)$$

$$i_{dc\,diff\,2} = i_{dc\,cap} + i_{dc\,an} - i_{dc\,bp} - i_{dc\,bn} \quad (23)$$

Kuten jo kohdassa 5.4 mainittiin, virta kulkee maadoituskondensaattoreiden kautta ja tarkalleen ottaen vain toisen niistä, jolloin jännitteet voidaan kirjoittaa  $V_{p1} = V_{p2} = V_{DC} / 2$ . Tästä seuraa, että differentiaalisten mittamuuntajien virtojen suuruudet voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$|i_{dc\,diff\,1}| = \frac{1}{n} \cdot \frac{V_{DC/2}}{R_{vika}} \quad (24)$$

$$|i_{dc\,diff\,2}| = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{V_{DC/2}}{R_{vika}} \quad (25)$$

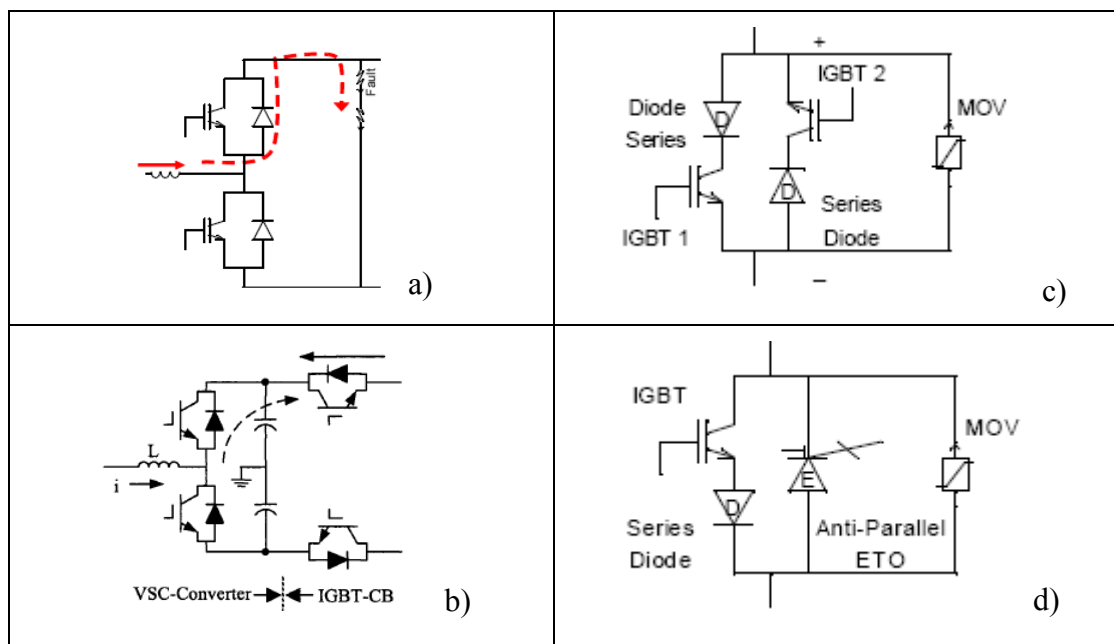


Niille solmupisteille, joiden välissä vika sijaitsee, virta  $i_{dc\text{diff}2}$  on polariteetiltaan negatiivinen. Näin saadaan vika rajattua tietylle kaapelisegmentille. Toisaalta, jos virta  $i_{dc\text{diff}1}$  on negatiivinen, sijaitsee vika positiivisen navan ja maan välissä. Muille solmupisteille virta  $i_{dc\text{diff}2}$  on lähellä nollaa tai hieman positiivinen, koska vikavirta kulkee tasapuolisesti kaikissa kaapelisegmenteissä. Solmupisteiden määrän  $n$  kasvaessa mittamuuntajan havaitsema virta  $i_{dc\text{diff}2}$  lähenee asymptootisesti arvoa  $V_{dc/2} / R_{vika}$ . [28]

Yllä esitetty menetelmä on vain yksi monista ja soveltuu pääasiassa rengasmaisen verkon vikojen paikantamiseen. Vian paikantamiselle voidaan luoda lukuisia määriä erilaisia menetelmiä, joiden topologiat riippuvat myös hyvin paljon DC-verkon solmupisteiden toteutustavasta ja niiden maadoituksesta. Tehokas virtasuojaus edellyttää myös virran muodon tarkkailua. Esimerkiksi [76] rautateiden DC-verkossa etäällä olevan vian aiheuttama virta voi olla pienempi kuin junan käynnistysvirta. Ratkaisuna on esim. jatkuva-aikainen virranmittaus ja ylivirtasuojaus täydennetään di/dt-delta i -suojauskella. Jos mitattu di/dt-arvo poikkeaa asetetusta arvosta tietyn ajan, lasketaan tälle ajalle virran integraali, jota verrataan sitten laukaisun aiheuttavaan asetusarvoon.

## 5.7 Kehittyneet suuntaajat vian hallinnassa

Tyypillinen PWM-ohjattu jännitelähdekonvertteri ei tasajännitepuolen oikosulkutapauksissa pysty vaikuttamaan oikosulkuvirtaan, vaan oikosulkuvirta pääsee syöttämään vikapaikkaa IGBT:n rinnalle kytketyn estosuuntaisen diodin kautta. Tällöin oikosulun hallinta edellyttää suuntaajan AC-puolelle nopeaa katkaisijaa tai suuntaaja suojataan [75] ns. IGBT-katkaisijalla (ks. kohta b Kuva 5-4). Kun IGPT/diodi-yhdistelmä korvataan ns. soft-shutdown-tekniikalla, voidaan hilajännitettä pienentää dynaamisesti, kunnes laite on kokonaan sulkeutunut ja samalla rajoitetaan oikosulkuvirtaa. Soft-shutdown-konsepti voidaan toteuttaa käyttämällä sekä myötä- että estosuuntaan IGBT:n ja sarjadiodin yhdistelmää tai ETO (Emitter Turn-off) -komponenttia, jolla on korkeat virta- ja jännitearvot ja suuri kytkentänopeus (Kuva 5-4). [72]



Kuva 5-4. Konvertteri a) perustyyppi: IGBT + diodi, b) VSC ja IGBT-CB, c) IGBT + sarjadiodi myötä- ja estosuunnassa, d) IGBT + sarjadiodi ja estosuunnan ETO. [72]

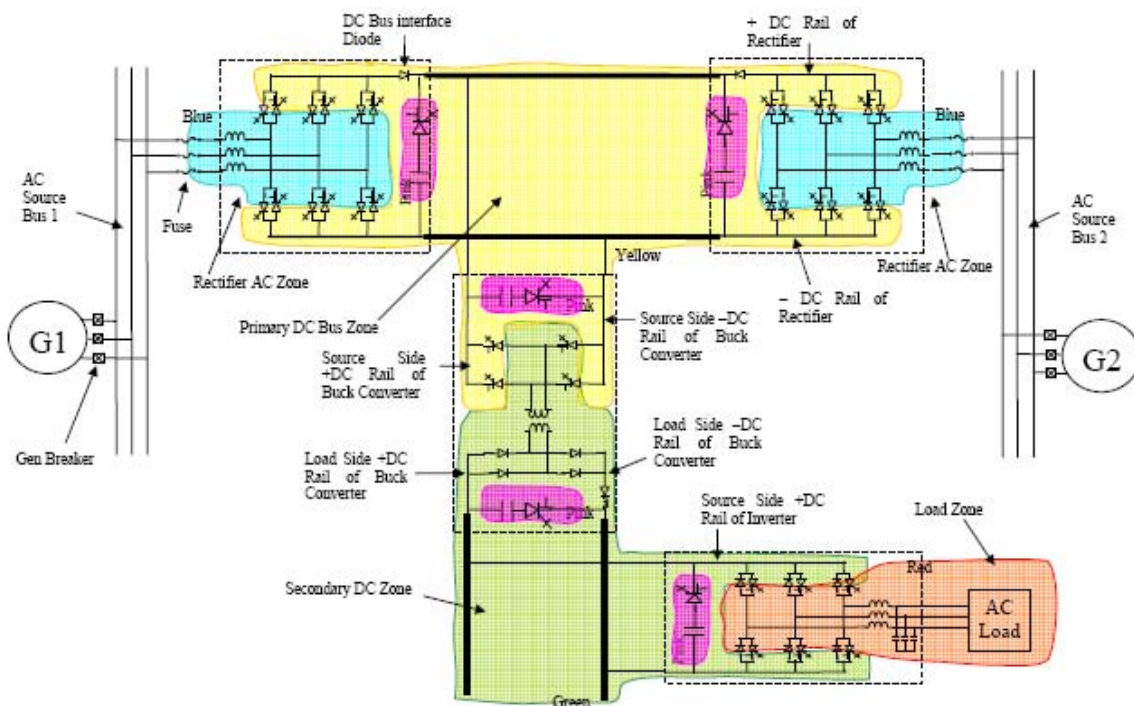
ETO-komponenteilla varustettu konvertteri reagoi vikavirtaan 1 ms:ssa ja rajoittaa ja katkaisee virran estäen jännitteen nousun korkeaksi. Vastaavasti rakennetta voidaan soveltaa invertteriin ja suojata kondensaattoriin, jolloin kondensaattorin purkautuminen vikatapauksessa estettäisiin ja nopeutettaisiin järjestelmän uudelleenkäynnistystä vikatilanteen poistumisen jälkeen.

## 5.8 Agenttipohjainen vianhallintamenetelmä

Moniagenttipohjainen järjestelmä on eräs kehittyneistä vianhallintamenetelmistä. Mm. Nikhil Ravindra Mahajan on väitöskirjassaan ehdottanut DC-jakeluverkon suojaukseen agenttipohjaista suojausmenetelmää ja ETO-komponenttien hyödyntämistä. Järjestelmä sopii paitsi laivojen tasajännitejakelun toteuttamiseen myös muuhun tasajännitejakeluun. [72]

Agenttipohjaisessa suojausjärjestelmässä verkko jaetaan erityyppisiin suojausvyöhykkeisiin, agentteihin. Vika huonosti suojatussa DC-järjestelmässä voi johtaa suuriin vikavirtoihin, kun kaikki DC-verkossa olevat kondensaattorit purkautuvat. Agenttijärjestelmä pystyy, käyttämällä mittauksia hyväkseen, paikallistamaan vian nopeasti ja etsimään oikeat menetelmät vian hallintaan. Menetelmässä verkko jaetaan potentiaalisiiin vikavyöhykkeisiin (Kuva 5-5). Järjestelmä koordinoi erilaisten suojalaitteiden/agenttien joukkoa ja hoitaa back-up-suojauksen, jos jokin suojalaite/agentti pettää. Koordinointi hoidetaan suojalaitteiden/-alueiden luokittelulla ja toiminnan ajoituksella, so. turvataan

suojauksen selektiivisyys. Koordinoitu toiminta edellyttää myös oikein mitoitettuja suo-  
jalaitteita esim. sulakkeita tai katkaisijoita. Suoja-agentit pyrkivät paikallistamaan vian  
alle 1 ms:ssa ja korjaamaan vikatilanteen esim. estämään vikavirran syötön vikakohtaan  
käyttäen hyväksi ETO-komponentein varustetun kehittyneen konvertterin ominaisuuksia.  
Back-up- suojauksessa pyritään erottamaan viallinen alue muusta järjestelmästä.  
Agenttipohjaisen uudelleen konfigurointitoiminnan tavoitteena on taata globaali, järjes-  
telmätason automaattinen toiminta, joka minimoi vika-alueeseen kuuluvan järjestelmän  
ja seisonta-ajan. [72]



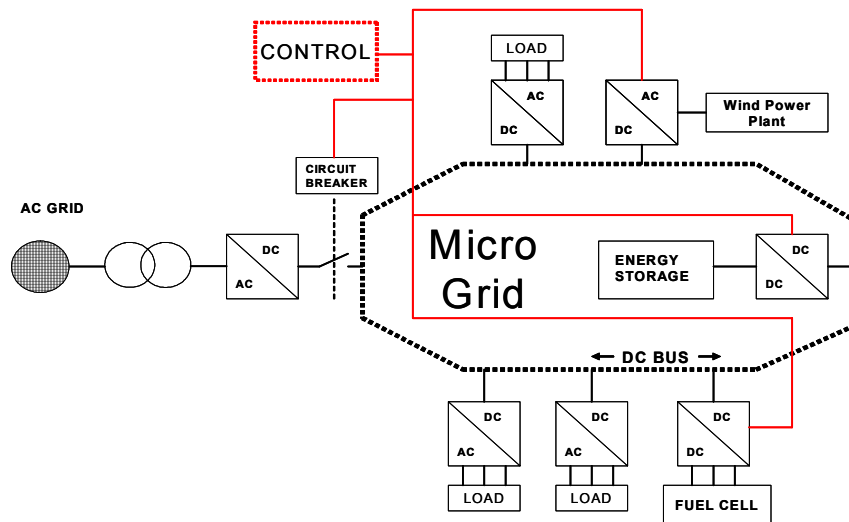
Kuva 5-5. Esimerkki laivan DC-verkon jaosta vikavyöhykkeisiin. [72]

Agenttipohjaista menetelmää voidaan käyttää paitsi tasajänniteverkon vianhallinnassa  
myös koko verkon toimintojen hallinnassa kuten säädössä, ohjauksessa ja saarekekäyt-  
töön siirtymisen hallinnassa. Kokonaisvaltainen agenttipohjainen hallintajärjestelmä  
edellyttää kuitenkin nopeaa kommunikointia agenttien kesken ja/tai paikallisagenttien ja  
hallinta-agentin välillä ja onkin siksi helpompi toteuttaa suljetussa järjestelmässä, kuten  
laivojen tasajännitejakelussa.

## 6. Tasajänniteverkon kuormanjako ja ohjaus

### 6.1 Yleistä

DC-jakeluverkon ohjauksella on suurin rooli verkon oikeassa toiminnassa. Ohjauksen pääasiallisena tarkoituksena on ohjata kuormanjakoa sekä laitteiden toimintaa mahdollisissa vikatilanteissa. Ohjaustapoja on olemassa lukuisia, mutta DC-jakeluverkolle on olemassa neljä realistista ratkaisua, Voltage Droop –ohjausmetodi (kohta 6.4), Average Current –ohjausmetodi (kohta 6.5), Master Slave –ohjausmetodi (kohta 6.6) ja Central Limit –ohjausmetodi (kohta 6.6). Näiden ohjausmetodien suurimpana keskinäisenä erona on se, että toiset menetelmät vaativat ehdottoman kommunikaation eri suuntaajien välillä, kuten seuraavan periaatteellisen kuvan (Kuva 6-1) keskitetyssä ohjausratkaisussa. Toisissa taas kommunikointia verkossa olevien laitteiden välillä ei ole, vaan ohjaus perustuu ainoastaan DC-verkon jännitteen suuruuteen kullakin hetkellä [27].



Kuva 6-1. Taajaman tasajänniteverkon keskitetty ohjaus.

Tulevaisuus ja tämän hetkiset viimeiset kehitysaskleet asettavat ohjausmenetelmän sovellettavuudelle käytännössä tiettyjä kriteerejä. Käytetyn ohjausmenetelmän tulisi täyttää ja mahdollistaa ainakin seuraavat ominaisuudet toimiakseen DC-jakeluverkon jännitteen ja stabiilisuuden ylläpitäjänä:

- yleinen ratkaisu kaikille DC-verkkoon liitettäville laitteille
- ohjauksen nopea kuormanjako, vaikka AC-verkossa esiintyisi vakavia käyttökatkoksia
- tulevaisuudessa yleistyvien etämittauksen ja tiedonsiirron hyödyntäminen tehokkaasti
- hajautetun tuotannon tarpeiden huomioon ottaminen.

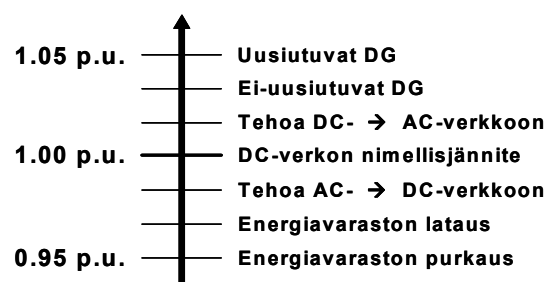
Seuraavaksi tarkastellaan kuormanjakoperiaatetta ja erilaisia ohjausmetodeja kuormanjaolle ja jännitteen ohjaukselle.

## 6.2 Kuormanjakoperiaate

DC-verkon kuormanjako voidaan toteuttaa monella tavalla. Kuormanjaon hierarkian muodostaminen riippuu luonnollisesti laitteiden nimellistehoista ja ominaispiirteistä sekä kyseisen DC-verkon tarpeista.

Voidaan esimerkiksi muodostaa seuraavanlainen ohjaustopologia (Kuva 6-2). AC-verkon ja DC-verkon välisen suuntaajan läpi ei kulje tehoa kumpaankaan suuntaan jännitteen ollessa lähellä nimellistä. Jännitteen noustessa liikaa kytkeytyy ensin ei-uusiutuva hajautettu tuotanto pois verkosta, jonka jälkeen ainoastaan uusiutuva energiantuotanto on toiminnassa. Jännitteen noustessa edelleen kytketään kaikki tuotanto pois verkosta. Tämä vastaa tilannetta, jolloin kuormaa ei ole, joka voi johtua esimerkiksi viasta DC-verkossa, jolloin tuotantolaitos voi sijaita sellaisessa kaapelisegmentissä, jossa ei ole kuormia lainkaan.

Jännitteen laskiessa otetaan tehoa AC-verkosta, ja myös siis hajautettu tuotanto on käynnissä täydellä teholla. Jännitteen laskiessa edelleen lopetetaan energiavarastojen lataus, jolloin samanaikaisesti varastot alkavat syöttää tehoa verkkoon. Voidaan määrittellä, että jännitteen laskiessa alle 5 %:iin nimellisestä koko järjestelmä sammutetaan. Tämä on mahdollista tilanteessa, jossa energiavarastot ovat tyhjä, AC-verkossa on käyttökatkos ja hajautettu tuotanto ei pysty tuottamaan riittävää tehoa jännitteen ylläpitämiseksi. [50]



Kuva 6-2. DC-verkon kuormanjaon hierarkia ja jännitteen raja-arvot. [50]

DC-verkon kuormanjakoa ja jännitteenalenemaa voidaan laskea johtamalla kaava AC-verkon tehonjaon yleisestä solmupistemenetelmästä. Koska laskennan alussa ei virtoja tunneta, voidaan ne esittää jännitteiden ja tehojen avulla. Jännitteille asetetaan laskennan alussa alkuarvot, jolloin voidaan laskea jokaiselle DC-verkon solmupisteelle jännitteet. Käytetään saatuja jännitteitä alkuarvojen sijasta ja jatketaan iterointia kunnes las-

kentakerrosten jännitteiden erot ovat pienet. Tätä kutsutaan Gauss-Seidel- menetelmäksi. [49]

$$\mathbf{I} = \mathbf{V}\mathbf{Y} \Rightarrow \mathbf{V} = \mathbf{Y}^{-1}\mathbf{I} \quad (26)$$

Solmupisteadmittanssimatriisi voidaan kirjoittaa yleiseen muotoon käyttäen summa merkintää seuraavasti:

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \cdot \left( \frac{P_k}{V_k} - \sum_{\substack{n=1 \\ k \neq n}}^N Y_{kn} \cdot V_n \right) \quad (27)$$

$V_k$  on solmupisteen  $k$  jännite

$V_n$  on solmupisteen  $n$  jännite

$Y_{kn}$  on kahden solmupisteen  $k$  ja  $n$  välinen admittanssi

$Y_{kk}$  on solmupisteen liittyvien admittanssien summa

$P_k$  on solmupisteen teho

$k, n$  on solmupisteen numero

$N$  on solmupisteiden kokonaismäärä.

Solmupisteiden virrat voidaan selvittää tiedettäessä niiden jännitteet ja tehot. Varsinaisen kuormanjaon toimivuus muuttuvissa kuormitustilanteissa on hyvin riippuvainen käytettävästä ohjausmetodista. Siksi tässä kohdassa käsitellään kuormanjakoa ainoastaan yleisellä tasolla.

## 6.3 Komponenttien mallinnus

### Teholähteiden mallinnus

Suunniteltaessa kuormanjakoa DC-verkon teholähteitä voidaan mallintaa jännitelähteinä, joiden kanssa on kytketty sarjaan pieni resistanssi. Suuntaajat, akkulaturit ja DC-generaattorit ovat melko jäykkiä lähteitä ja säilyttävät ulostulojännitteen miltei samana sekä kuormalla että ilman. Jos kuormavirta nousee yli nimellisarvon, lasketaan erillisen ylivirtasuojapiirin avulla jännitettä virran rajoittamiseksi ja samalla suojataan sisäisiä komponentteja. Virta on yleensä rajoitettu 150 %:iin nimellisestä. Kuormavirran ylittäessä tämän arvon voidaan lähteiden käyttäytymistä DC-verkossa kuvata virtalähteinä. DC-generaattoreilla ilmiö on lievempi verrattaessa suuntaajiin ja akkulatureihin.

Energiavarastojen ulostulojännitteen stabiilisuus ei ole hyvä. Jännite muuttuu pääasiassa energiavaraston varaustilan funktiona. Siksi sen mallintaminen pysyvän tilan tarkaste-

luissa on ongelmallista. Laskuissa se on kuitenkin otettava huomioon, jolloin energiavaraston ulostulojännite arvioidaan tai tarkastelu tehdään jollakin tietyllä ajan hetkellä. [49]

Energiavarastojen etuna on kuitenkin erittäin hyvä kyky tasata DC-verkon jännitettä ja tehontarvetta kulutushuippujen ja vikatilanteiden aikana. Energiavarastojen kytkeminen DC-verkkoon ilman DC-katkojan tarjoamaa ohjausmahdollisuutta on epätodennäköistä. Näin voidaan myös varmistaa tasainen ulostulojännite DC-katkojan avulla.

Tasajännitelähteitä koskee mm. standardi IEC 61204-7, joka määrittelee turvallisuusvaatimukset tasajännitelähdön omaaville tehon syöttölaitteille, joiden sisääntulojännitteen maksimiarvo on joko 1 000 VDC tai 600 VDC.

### **Kuormien mallinnus**

Kuormia voidaan mallintaa joko resistanssin, tehon tai virran vakioarvoina. Suunnittelun kannalta on erittäin tärkeää erilaisten kuormien mallintaminen oikealla tavalla tehokkaan kuormanjaon takaamiseksi. Jännitteen laskiessa resistiivisten kuormien ottama virta laskee lineaarisesti, vakiotehoisten kuormien virta nousee lineaarisesti ja vakiovirtakuormien ottama virta pysyy lähes samana koko jännitealueella. [49]

Pääasiassa DC-verkossa esiintyvät kuormat ovat niiden ottaman tehon mukaan mallinnettavia. Tähän kategoriaan kuuluvat tasasuuntaajat, vaihtosuuntaajat, DC-katkojat ja DC-moottorit. DC-jakeluverkkoon suoraan kytkettäviä resistiivisiä kuormia ei juuri käytännössä ole. Tämä johtuu siitä, että sähköenergia vaihtosuunnataan loppukäyttäjille, jolloin suuntaajat ovat pääasiallisia, tehoa kuluttavia komponentteja DC-verkossa.

### **Kaapelien ja komponenttien mallinnus**

Pysyvän tilan kuormanjaon mallintamisen kannalta ainoastaan kaapelien ja DC-kiskojen resistanssit tulee ottaa huomioon. Induktanssien merkitys kasvaa tarkasteltaessa kuormanjaon transientti-ilmiöitä.

Kaapeleiden ja erilaisten suojauskomponenttien impedanssien laskennassa tulee ottaa huomioon niiden käyttölämpötila. Kuormitusvirtojen ollessa suuria kaapelin ominaisresistanssin arvo kasvaa materiaalien lämpötilan noustessa merkittävästi. Jotta voitaisiin määrittää DC-verkon siirtohäviöiden suuruudet, muodostetaan jokaista kaapeliosuutta vastaavien ekvivalenttien impedanssien avulla impedanssiverkko, jonka avulla voidaan myös helposti määrittää oikosulkuimpedanssit. Oikosulkuimpedanssi-tarkastelut tulee tehdä kaapeleiden korkeammalla lämpötilalla johtuen suurista oikosulkuvirroista. Sulakkeiden, katkaisijoiden, pehmokäynnistimien ja kontaktorien impedansseja ei tarvitse ottaa huomioon muodostettaessa impedanssiverkkoa niiden sarjaimpedanssien arvojen ollessa lähellä nollaa. [49]

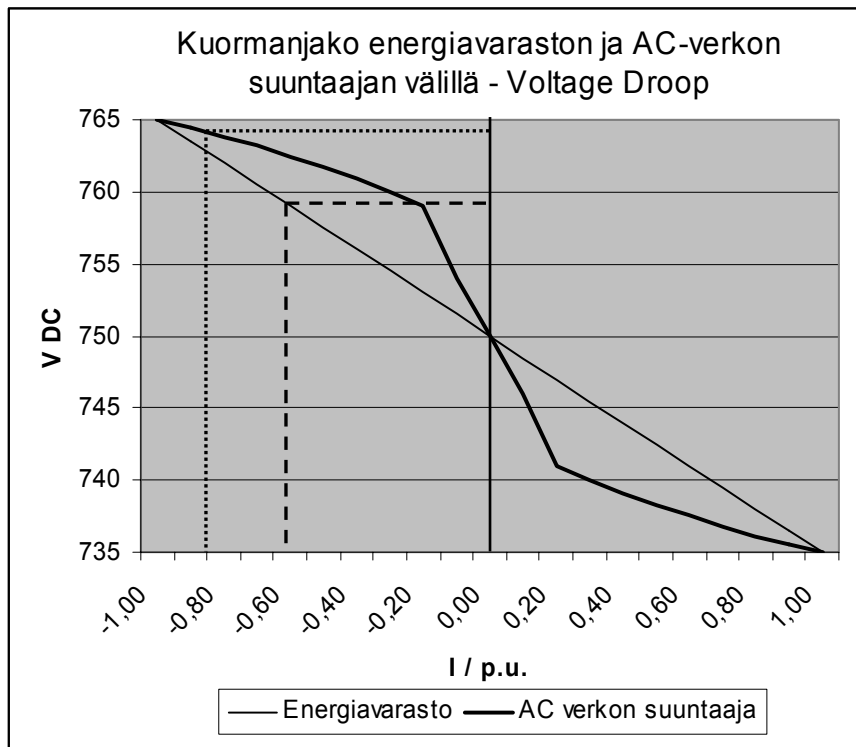
## 6.4 Voltage Droop -ohjausmetodi

Voltage Droop -ohjausmetodi perustuu jokaisen suuntaajan kykyyn ohjata DC-verkossa näkyvää omaa impedanssiaan verkon jännitteen mukaisesti. Tämä metodi ei vaadi min-käänlaista tietoliikenneyhteyttä suuntaajien yhteiseen toimintaan kuormanjaon ja jännitteen ylläpitämisen toteuttamiseksi. Tarkoituksena on jakaa kuormat ja verkostohäviöt kaikkien verkossa olevien syöttävien suuntaajien kesken suhteellisesti tasan siten, että vaikka suuntaajien nimellistehot vaihtelisivat, on jokaisella suuntaajalla prosenttisyksiköissä sama kuormitus. [28]

Voltage Droop -ohjausmetodilla voidaan priorisoida eri laitteiden toimintaa ja reagoitukykyä jännitteen muutoksille. DC-verkossa esiintyvien laitteiden ominaisuuksien ja säätömahdollisuuksien perusteella voidaan määritellä esimerkiksi, kuinka suuriin jännitteen vaihteluihin reagoidaan ottamalla lisää tehoa AC-verkon kautta. Jännitteen vaihtelut tulisi pyrkiä hoitamaan paikallisella tuotannolla sekä energiavarastoilla.

Seuraavassa kuvassa (Kuva 6-3) on esitetty energiavaraston ja AC-verkon suuntaajan välinen kuormanjakokäyrä, joka tuo esille niiden välisen prioriteettisuhteen DC-verkon kuormanjaossa. Kuvassa olevat katkoviivat havainnollistavat sitä, että jännitteen kasvaessa DC-verkossa energiavaraston latausjännite ylittyy ja lataus alkaa välittömästi ja loppuu jännitteen palatessa arvoon 750 V DC. AC-verkon suuntaajan osalta noussut jännite tarkoittaa, että tehoa syötettäisiin AC-verkkoon päin. Tilanne on päinvastainen molemmilla laitteilla jännitteen laskiessa. Suorien kulmakertoimia ja taitekohtia muuttamalla voidaan konfiguroida sopivat säätörajat mille tahansa systeemille ominaisiksi.





Kuva 6-3. Kuormanjako energiavaraston ja AC-verkon suuntaajan välillä – Voltage Droop -ohjausmetodi. Kuvassa virrat ja jännitteet ovat kuvitteellisia, eivätkä vastaa mitään todellista tilannetta. [31]

Voltage Droop -ohjausmetodin etuihin kuuluu se, että kaikki kuluttajat ja tuottajat voivat vapaasti liittyä verkkoon milloin tahansa, koska kaikki liittyjät käyttäytyvät verkossa samalla tavoin kuormanjaon toteuttamiseksi. Tämä ohjausmetodi soveltuisikin erittäin hyvin vapaille hajautetun energiantuotannon markkinoille, jossa jokainen saa itse päättää esimerkiksi tuotettavan energian määrästä ja ajankohdasta.

Voltage Droop -ohjausmetodin rajoituksena on se, että hyvää jännitteen säätöä ei voida saavuttaa yhtä aikaa hyvän kuormanjaon kanssa. Hyvä jännitteen säätö edellyttää suurta DC-vahvistusta, mutta jos syöttävät moduulit eivät ole identtisiä tuloksena voi olla huono kuormajakotilanne. Voltage Droop -ohjausmetodissa voi syntyä virhe jännitteessä, jos ei oteta huomioon suuntaajien impedanssien muutosta jännitteen funktiona. Joidenkin lähteiden mukaan Voltage Droop -ohjausmetodi ei sovellu tästä syystä lukuisten suuntaajien kytkemiseen rinnan. [46]

Jännitteen virheen syntyä voidaan kuitenkin ehkäistä ottamalla se huomioon suunniteltaessa ohjauksen vahvistusta. Vahvistuksen tulee muuttua dynaamisesti kuormitustilanteen mukaan. Ohjaukselle voidaan määrittellä ekvivalenttinen virtuaalinen impedanssi, jonka tulee olla suoraan verrannollinen suuntaajien nimellistehoon. Ekvivalenttinen virtuaalinen impedanssi on kääntäen verrannollinen ohjauksen vahvistukseen. [28]

$$Z_{droop} = \frac{1}{K} = \frac{V_{dc,ref}^2}{P_n} (1 - \delta_n) \delta_n = Z_n (1 - \delta_n) \delta_n \quad (28)$$

$P_n$  on suuntaajan nimellisteho

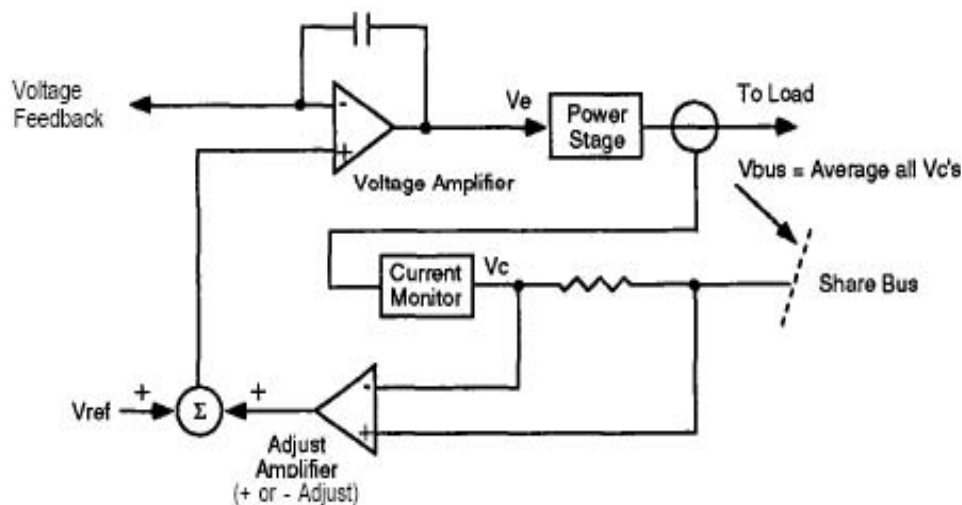
$V_{dc,ref}$  on referenssijännite

$K$  on ohjauksen vahvistus

$\delta_n$  on suuntaajan suhteellinen jännitteenalenema nimelliskuormalla.

## 6.5 Average Current -ohjausmetodi

Average Current -ohjausmetodi perustuu keskimääräiseen tai painotettuun keskimääräiseen virtaan ja automaattiseen virran jakoon ilman erillistä ohjausyksikköä. Kukin lähdon ohjauksessa on säätöpiiri, jonka navat on kytketty resistanssin yli. Resistanssi on kytketty kaikkia suuntaajia yhdistävään väylään tai tarkemmin solmupisteeseen, jonka jännite on verrannollinen keskimääräiseen virtaan. Suuntaajan virran poiketessa keskimääräisestä virrasta, syntyy resistanssissa jännitehäviö, jolloin säätöpiiri säätää ulostulojännitettä oikeaan suuntaan riippuen jännitehäviön suunnasta.



Kuva 6-4. Average Current -ohjausmetodi, kytkennän periaate. [47]

Ohjausmetodin ongelmaksi voi muodostua yhteisen virtaväylän kuormittaminen, oikosulku tai jonkin osapuolen poiskytkentä. Tällöin keskimääräinen virta nousee, jolloin säätöpiiri säätää jännitteen alimmalle sallitulle jännitetasolle. Tällöin jännite laskee DC-verkossa, mikä voi aiheuttaa lisää ongelmia.

Ongelma voidaan ehkäistä kytkemällä resistanssin tilalle diodi, jolloin säätöpiiriin syntyy ainoastaan sen suuntainen jännitehäviö, että se on ainoastaan kykenevä kasvattamaan

jännitettä DC-verkossa. Tällöin puhutaan korkeimman virran ohjausmetodista. Toimintakyvyttömät suuntaajat eivät haittaa kuormanjakoa. Lisäksi voidaan määritellä, että virtaväylän oikosulussa säätöpiiri kytkeytyy irti ja suuntaajat toimivat itsenäisinä yksikköinä. [47]

## 6.6 Master Slave -ohjausmetodi

Master Slave -ohjausmetodi pääperiaatteena on se, että yksi suuntaajista saa arvokseen ”master”, jonka tehtävänä on tuottaa kaikki teho jännitteen ylläpitämiseksi DC-verkossa. Muut suuntaajat saavat arvokseen ”slave”, joiden tehtäväksi jää kuormanjako ja virranjakovirheen pitäminen rationaalisissa rajoissa. Jokainen ”slave”-suuntaaja saa tiedon ”master”-suuntaajan virrasta ja tuottaa tehoa sen mukaisesti verkkoon. Tämän vuoksi tarvitaan nopea tietoliikenneyhteys eri toimijoiden välille. ”Slave”-suuntaajien tehoa kasvatetaan, jos ”master”-suuntaajan kyky ylläpitää jännitettä ei enää riitä. Tällä tavoin saavutetaan tehokas jännitteen ja kuormanjako. [45], [46]

Ohjausmetodin suurimpana puutteena voidaan pitää sen varautumista yhden kortin varaan. Jännitteen ylläpitämisen ollessa pääasiassa yhden suuntaajan varassa aiheuttaa sen rikkoutuminen koko verkon menetyksen. Lisäksi ”master”-suuntaajan kytkeytyessä verkkoon se aiheuttaa suuren transienttiylivirran ulostuloon, joka on haitallinen verkon komponenteille ja aiheuttaa jännitteeseen kuoppia.

Master Slave -ohjausmetodin eräs muunnelmä on menetelmä, jossa ”master”-suuntaajan PWM signaali jaetaan ”Slave” -suuntaajille.

## 6.7 Central Limit -ohjausmetodi

Central Limit -ohjausmetodi on hyvin samankaltainen Master Slave -ohjausmetodin kanssa ja perustuu siihen. Suurin ero metodien välillä on, että Central Limit -ohjausmetodin hyötysuhdetta parannetaan kytkemällä käyttöön ainoastaan tarvittava määrä tehonlähteitä verkkoon, jolloin suuntaajien huono hyötysuhde pienellä kuormalla ei huononna kokonaisyötysuhdetta. [48]

Toisin kuin Master Slave -ohjausmetodissa, jossa suuntaajat seuraavat ”master”-suuntaajan virtaa, Central Limit -ohjausmetodin suuntaajat kytkeytyvät verkkoon ja pois minimi- ja maksimivirtarajojen mukaisesti. Virtarajojen suuruus riippuu verkossa olevien suuntaajien lukumäärästä. Näin saadaan virranjakovirhe erittäin pieneksi sekä kokonaisyötysuhde korkeaksi, koska kaikki aktiiviset suuntaajat toimivat nimelliskuormalla. Ohjausmetodin käyttäytymistä voidaan kuvata seuraavalla epäyhtälöllä. [47]

$$(n-1) \cdot I_{\max} \leq I_N \leq n \cdot I_{\max} \quad (29)$$

$I_{\max}$  on suurin yhdelle suuntaajalle sallittu virta  
 $I_N$  on DC-verkon virta.

Ohjausmetodin ongelmana on sen kyseenalainen soveltuvuus DC-jakeluverkon tarpeisiin. DC-jakeluverkossa todennäköisesti kaikki tuottajat haluavat tuottaa suurimman osan ajasta, jolloin niiden ohjaamista yllä mainitulla tavalla ei voida sallia.

## 7. Energian hallinta ja energiavarastot taajaman DC-jakeluverkon yhteydessä

### 7.1 Yleistä

Yhteiskunnan suuntautuessa yhä vahvemmin kohti tietoyhteiskuntaa on loppukäyttäjien oletuksien itseisarvona luotettava energian saanti. Myös uusiutuvan energian käyttöä pyritään lisäämään, jotta voitaisiin vähentää päästöjä. Uusiutuvalla energiantuotannolla on pääasiassa suurta kasvupotentiaalia etenkin pienten tuotantoyksiköiden alueella. Tämä on johtanut ajatukseen hajautetusta energiantuotannosta, joka lisäisi energian saannin luotettavuutta kulutuskohteissa ja toisaalta vähentäisi massiivisten siirtojohtojen tarvetta.

Hajautetun tuotannon lisääntyessä jakeluverkoissa kasvaa ohjauksen ja automaation tarve. Suurta vauhtia kehittyvä tietoliikennearkkitehtuuri luo mahdollisuuksia energian hallinnan toteuttamiseen tehokkaasti. Jotta hajautettujen energiajärjestelmien implementointi menisi eteenpäin ja tuottaisi toivottuja tuloksia, tulee kehitystä tapahtua seuraavilla osa-alueilla:

- liiketoiminnan kehittäminen tukemaan hajautettuja energiajärjestelmiä
- alueellisten kokonaisuuksien ja tasapainon hallinta keskitetysti
- yksittäisten tuotanto- ja kulutuskohteiden ohjauksen yhtenäistäminen.

Tässä työssä tutkittavan DC-jakeluverkon hyödyntämistä taajaman sähköjakelussa pidetään hajautetun tuotannon ja energiavarastojen liittämisen kannalta potentiaalisena ratkaisuna. DC-verkon tarjoamat mahdollisuudet energian hallinnalle ovat erittäin monipuoliset. Se antaa myös parempia toteutusmahdollisuuksia tuotteiden ja palveluiden luomiseen ja kehittelyyn. Yksittäisten tuotantokohteiden osallistuminen sähkömarkkinoille paranee, jos rajoitukset verkkoon liittymisestä saadaan lähes olemattomiksi.

DC-verkon etuina on se, että se mahdollistaa jakeluverkon jakamisen pieniin kokonaisuuksiin, joilla on omaa tuotantoa ja energiavarastoja. Kokonaisuuksien sisällä energian hallinta on helppoa, koska se voidaan jakaa edelleen pieniin osa-alueisiin. Näin saadaan kommunikaatiota vähennettyä keskittämällä kulutus- ja tuotantotiedot solmupisteisiin ja välittämällä ne siitä eteenpäin aluevastaaville.

Menettelemällä tällä tavoin asiakkaalle aiheutuvat kustannukset uusien laitteiden myötä saadaan pidettyä kohtuullisina, koska liityntälaitteiden ohjaus ja automaatio voidaan toteuttaa avoimen arkkitehtuurin periaatteella. Tällöin liityntälaitteiden valmistajien määrä kasvaisi ja kilpailu pitäisi hinnat kurissa. Liityntälaitteille tulisi myös muodostaa standardi.

## 7.2 Energiavarastot

### 7.2.1 Tyypit

Sähkön laadunhallintaan on käytettävissä hyvin monia erilaisia energiavarastoteknologioita. Monet niistä eivät kuitenkaan ole vielä käytännössä varteenotettavia ratkaisuja joko niiden korkean hinnan, elinkaaren keston tai monimutkaisen hallinnan vuoksi. Alla on esitetty lista varteenotettavista energiavarastojen teholuokista sekä niiden sovelluskohteista (Taulukko 7-1).

*Taulukko 7-1. Energiavarastojen sovelluskohteita ja niille ominaisia arvoja tehon, energian ja purkuajan osalta. [54]*

Teknologia	Tehoarvio	Energia	Purku aika	Sovelluskohde
Lyijyakut	1–10 MW	500 MWh	päiviä	Sähkön laatu, huippukuormat, kuljetus, varavoima, pitkän ajan varavoima
Kehittyneet akut	1–10 MW	500 MWh	päiviä	Sähkön laatu, huippukuormat, kuljetus, varavoima, pitkän ajan varavoima
Superkondensaattorit	1 MW	0,2 kWh	sekunteja	sähkön laatu, moottorin käynnistys, kuormahuiput, nopeat kohteet
SMES	1–100 MW	500 MWh	tunteja	Sähkön laatu, huippu kuormat, kuljetus, varavoima
H <sub>2</sub> poltto-kennot	1–10 MW	500 MWh	päiviä	Sähkön laatu, huippukuormat, kuljetus, varavoima, pitkän ajan varavoima
Vauhtipyörät	1–100 MW	500 MWh	tunteja	Sähkön laatu, huippukuormat, kuljetus, kohtuullinen varavoima

Sähkön laadun hallintaa tukeviin ratkaisuihin soveltuvat erityisesti erilaiset akut, vauhtipyörät ja magneettiseen energiaan perustuvat energiavarastot.

Akkujen kehitystyö on hidasta, eikä sähköenergian taltioimiseen käytettyjen perinteisten lyijyakkujen suorituskykyä ole huomattavasti saatu parannettua. Nykyään kuitenkin esimerkiksi Litium-ioni-akut alkavat olla kustannuksiltaan järkevällä tasolla. Vaikka akkujen materiaaleina käytetään monia eri alkuaineita ja ratkaisuja, voidaan niiden suorituskykyä ja ominaisuuksia kuvata seuraavien parametrien avulla:

- energiatiheys eli kapasiteetti (Wh/kg tai Wh/l)
- tehoteho eli ominaisteho (W/kg tai W/l)
- ulostulojännite ja purkausprofiili

- lataus-purkauskertojen lukumäärä
- itsepurkautumisnopeus, akun potentiaalin lasku sen ollessa ladattuna ja kuormittamattomana
- turvallisuustekijät: vikatilanteiden luonne ja todennäköisyys, materiaalien myrkyllisyys, komponenttien reaktiivisuus, käyttäytyminen oikosulussa
- elinikä
- hinta
- toimintaolosuhteet: korkea- tai matalalämpötilakennot, kennojen umpinaisuus tai ilmatiiveys, paineolosuhteet, mahdollinen biologinen yhteensopivuus
- ympäristölliset tekijät: materiaalien myrkyllisyys, materiaalien hävittäminen tai kierrätettävyys.

Akkujen vasteajat ovat tyypillisesti lyhyitä, joten niiden avulla voidaan hallita sekä nopeita lyhytkestoisia että myös pitkäkestoisempia vikoja. [54]

### 7.2.2 Käyttö

Energiavarastoja voidaan hyödyntää eri tavoin. Niiden hyödyn maksimointi riippuu etenkin niiden sijainnista jakeluverkossa, sekä tietenkin energiavaraston käyttäjän roolista. Energiavarasto voi tarjota joko suoraa tai välillistä hyötyä loppukäyttäjälle, tuottajalle tai jakeluverkonhaltijalle.

Käyttäjä voi varastoida energiaa halvan sähkön hinnan vallitessa ja käyttää sen hinnan noustessa. Tämä on erityisesti mahdollista käytettäessä 2-aika-tariffia, jolloin päivä- ja yösähkön hinnoissa on merkittävä ero. Esimerkiksi Helsingin Energian hinnaston mukaan yösähkön hinta on 33 % alempi.

Jos sähkönkäyttäjällä on teholiittymä, voidaan jo pienelläkin energiavarastolla saada aikaan suuri hyöty, mikäli kuukauden aikana esiintyvät huipputehot ovat lyhyitä, koska sähköyhtiöiden laskuttama tehomaksu koostuu kyseisen kuukauden aikana esiintyvistä huipputehosta. Energiavarastolla voidaan siis pienentää tehomaksun suuruutta merkittävästi. Sillä voidaan myös tasata nopeaa tehon vaihtelua, jolloin ehkäistään esimerkiksi mahdollista välkyntää (flicker), mutta ei kuitenkaan saavuteta suurta taloudellista hyötyä. Tämä voi tulla kyseeseen kohteissa, joissa sähkön laadulle on erittäin suuret kriteerit.

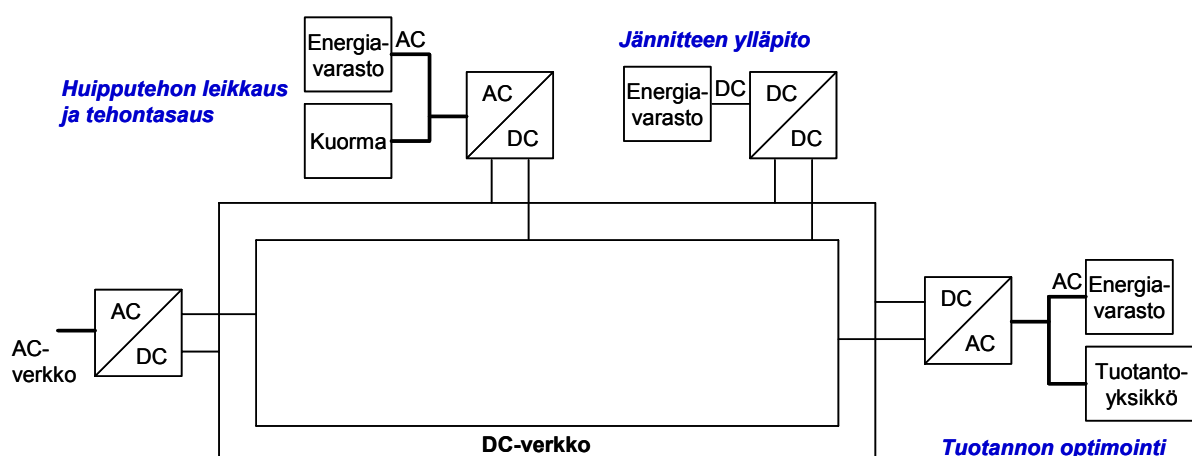
Tuottajalla on mahdollista sijoittaa osa tuottamastaan sähköenergiasta varastoon ja myydä se ELSPOT-markkinoilla hintojen ollessa suotuisat, jolloin puhutaan tuotannon optimoinnista. Tällöin voidaan tavallaan jäljitellä tilannetta, jossa sähköä tuotetaan suuren

säätövoiman omaavalla vesivoimalla. Energiavaraston investointikustannusten takaisinmaksu saadaan hyötynä myyntivoitoista korkeammalla hinnalla. Hajautetun tuotannon yhteydessä energiavarastolla voidaan tasoittaa sen verkkoon syöttämää tehoa, etenkin hajautetun tuotannon ollessa joko tuuli- tai aurinkovoimaa.

Jakeluverkon haltijan kannalta energiavarastoa voidaan hyödyntää sähkön laadun hallintaan asiakkaille. Taloudellista hyötyä saadaan mahdollisten katkosten poistumisella ja niistä aiheutuvien kustannusten eliminoitumisella. Lisäksi järjestelmät voidaan mitoittaa toisin, jolloin säästetään rakennuskustannuksissa ja verkostohäviöt pienenevät. Joissakin tapauksissa energiavarastolla voitaisiin välttää suuret investoinnit verkon vahvistamiseen.

### 7.2.3 Energiavarastojen käyttö DC-jakeluverkossa

DC-jakeluverkossa energiavarastojen rooli olisi erilainen kuin perinteisessä AC-jakeluverkossa, jossa on hajautettua tuotantoa. Sen sijaan, että pyrittäisiin pelkästään tasaamaan huipputehoja, on energiavarastojen, jotka on kytketty DC-verkkoon, tehtävänä ylläpitää verkon jännitettä. Energiavarastot ovat erityisen tärkeitä nopeasti muuttuvissa kytkentätilanteissa, joissa esimerkiksi jokin tuotantoyksikkö irtoaa verkosta tai verkon kuormitus muuttuu olennaisesti. Jos puuttuvaa tehoa ei voida tuottaa muilla DC-verkossa olevilla yksiköillä, takaavat energiavarastot tehon saannin kuormille eikä jännite laske liian alas aiheuttaakseen lisää ongelmia. Tilanteet voivat muuttua hyvin nopeasti ja palata takaisin, jolloin energiavarastolta vaaditaan nopeaa tehonantokykyä, mutta ei suurta energiakapasiteettia. Tämä tarkoittaa sitä, että varaston hinta pysyy kohtuullisena. Alla on havainnollistettu energiavarastojen sijoittelua ja käyttötarkoituksia energian hallinnassa DC-jakeluverkossa (Kuva 7-1).



Kuva 7-1. Energiavarastojen sijoittelu ja energian hallinnan roolit DC-jakeluverkossa.



Energiavarastoja voidaan myös käyttää lähellä kuluttajia tai tuottajia kytkettynä suuntaajien AC-puolelle, jolloin varastoja voidaan hyödyntää luvussa 7.2.2 mainituilla tavoilla. On kuitenkin tässä vaiheessa vaikeaa ennakoita tulevien DC-jakeluverkon asiakkaiden tariffityyppejä ja sitä, miten ne osaltaan vaikuttaisivat energiavarastojen soveltamistapoihin energian hallinnassa.

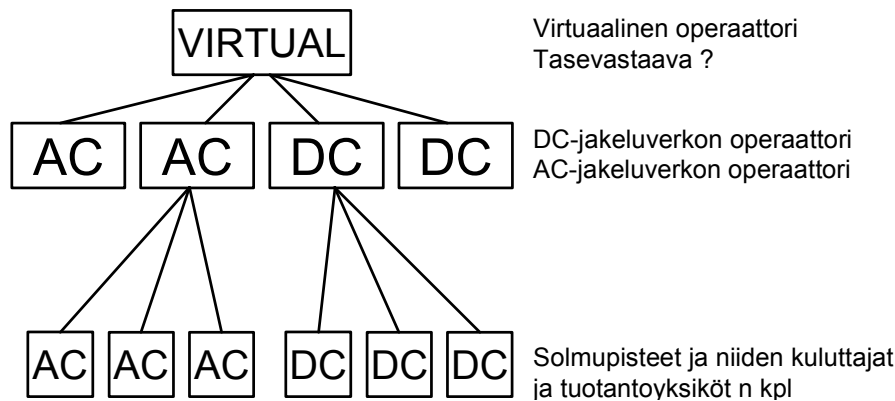
## 7.3 Energian hallinta DC-jakeluverkossa

### 7.3.1 Yleistä

Kuten jo kohdassa 7.1 mainittiin, DC-jakeluverkot tarjoavat erittäin hyvät mahdollisuudet monipuoliseen energian hallintaan. Jakamalla verkko pieniin osiin voitaisiin hajautetun tuotannon ja energiavarastojen välistä harmoniaa hallita tehokkaasti. DC-jakeluverkon ylimmän tason solmupisteet voisivat toimia tiedonkeruupisteinä. Solmupisteissä olisi enemmän automaatiota, joka toimisi siihen solmupisteeseen liittyneiden kuormien ja tuotantoyksiköiden alaoperaattorina. Solmupisteen alaoperaattorin tulisi pystyä käsittelemään ainakin seuraavia solmupisteen parametreja:

- kokonaiskulutus
- yksittäisten kuormien hetkellinen kulutus sekä kulutusennusteet (tyyppikäyrät)
- hajautetun tuotannon hetkellinen teho
- hajautetun tuotannon potentiaali ja ylimääräisen sähköenergian siirto solmupisteestä valtakunnan verkkoon → kommunikaatio operaattoriin → vapaa sähkömarkkina
- jännite
- oma sijainti
- tietoisuus verkotilasta (vikatilanteet, tehontarve).

Menettelemällä tällä tavoin yksittäisten kotitalouksien ei tarvitse olla yhteydessä kuin solmupisteen älykkääseen alaoperaattoriin, joka on sitten yhteydessä alueoperaattoriin. Alueoperaattorin tehtävät on melko selkeästi rajattu DC-jakeluverkon rakenteesta ja luonteesta johtuen. Operaattori olisi linkki valtakunnan verkon ja alueellisen DC-jakeluverkon välillä. Sen tehtävänä olisi huolehtia DC-jakeluverkon energian hallinnasta järjestelmätasolla. Sen kontrolloitavana olisi pääsyöttö AC-verkosta. Tällöin DC-jakeluverkko näkyisi valtakunnanverkossa joko kuormana tai lähteenä riippuen tilanteesta. Operaattorin toimintaan todennäköisesti liittyisi läheisesti tasevastaavien toiminta, koska operaattorin kontrolloiman pääsyötön takana voi olla suurikin tuotantopotentiaali. Eri verkontoimijoiden roolista energian hallinnassa lisää luvussa 8.



Kuva 7-2. Energian hallinnan tiedonkulkuhierarkia hajautetun tuotannon ja DC-jakeluverkkojen yleistyessä. Kaavio on mukautettu Smart Energy Management -ideasta, jossa virtuaalinen operaattori huolehtii itsenäisen verkon ylläpidosta ja taseista [55].

Käytännössä voidaan olettaa, että DC-jakeluverkot ovat aluksi vain osia perinteisistä AC-jakeluverkoista. Hajautetun tuotannon lisääntyessä tulevaisuudessa tultaisiin perustamaan eräänlaisia virtuaalisia operaattoreita, joiden tehtävänä on hallita jakeluverkon tuotannon ja kulutuksen tasapainoa paikallisesti. Yllä on esitetty energian hallinnan erilaisten parametrien tiedonkulkuhierarkia eri verkon osia välillä (Kuva 7-2). Niiden tehtävät voidaan jakaa seuraavasti:

- kysynnän hallinta (DSM)
- käytön hallinta
- sähkökaupan hallinta
- energian tuotannon ja varastoinnin hallinta.

### 7.3.2 DC-jakeluverkkotason energian hallinta

Jakeluverkkotasolla energian hallinnan pääasiallisena tehtävänä on pyrkiä ylläpitämään verkon toiminta kaikissa käyttötilanteissa. Tehokkaalla energian hallinnalla vältetään tasajännitteen liialliset muutokset. Jakeluverkkotason energian hallintaan liittyy myös läheisesti sähkön laadun hallinta. DC-jakeluverkossa se tarkoittaa tuotannon ja kulutuksen saattamista tasapainoon paikallisesti sekä tehokasta kuormanjakoa, jolloin DC-verkon jännite pystytään pitämään raja-arvoissaan, eikä ylimääräisiä virtoja esiinny verkossa.

DC-verkon DC/AC-liittymän jakeluverkkojen välillä voidaan siis olettaa kykenevän kommunikoimaan virtuaalioperaattorin kanssa. Kutsutaan sitä DC-jakeluverkon operaattoriksi. Toisaalta myös DC-jakeluverkon operaattori voi toimia kyseisen alueen virtuaalioperaattorin roolissa, mikäli DC-verkko on suoraan yhteydessä keskijänniteverkkoon tai alueellisten markkinoiden muodostuminen on ajanut siihen, että se on ainoa järkevä ratkaisu.

Varsinainen jakeluverkko muodostuisi siis siirtymäaikana sekä AC- ja DC-jakeluverkkoista, ja ne voisivat toimia rinnakkain saman virtuaalioperaattorin alaisuudessa. DC-jakeluverkon operaattorit olisivat tällöin ns. virtuaalioperaattoreiden alaisia operaattoreita, jotka toimisivat itsenäisinä yksikköinä.

### 7.3.3 Solmupistetaso energian hallinta

Tässä työssä solmupisteellä käsitetään DC-verkon sisäisiä solmupisteitä. Solmupisteitä voi olla eri tasoilla riippuen hyvin paljon käytettävästä DC-jakelujärjestelmäkonseptista, joita käsitellään tarkemmin kappaleessa. Kuitenkin solmupisteellä tarkoitetaan verkon kohtaa, johon liittyy esimerkiksi säteittäin muutamia kotitalouksia, ja siis mahdollisesti myös niiden tuotantoa. Solmupisteen ideana on sekä toimia verkon eri segmenttien yhdyiskohtana ja mahdollisena erottimena vikatilanteissa että toteuttaa maantieteellisesti pienen alueen kotitalouksien energian hallintaa.

Solmupisteellä olisi valta antaa käskyjä kotitalouksille joko kuorman pudottamisesta tai lisätuotannosta. Kotitalouksien liityntälaitteissa olisi määritelty niiden status verkossa, halu tuottaa ja mahdollinen kuormien hallintapotentiali. Kotitalouksien liityntälaitteissa olisi vastaavasti priorisoitu kodin eri laitteet, jolloin vähemmän tärkeät kuormat voitaisiin kytkeä irti ja asukkaat välttyisivät merkittävilta haittavaikutuksilta.

Solmupisteiden energian hallinta vastaa siis hyvin paljon suuremman kokonaisuuden energian hallintaa, mutta vain pienemmässä mittakaavassa ja yksinkertaisemmin. Erona jakeluverkkotason energian hallintaan on myös se, että solmupisteet ovat täysin automatisoituja. Niiden tehtäviin kuuluu jo kohdassa 7.3.1 mainitut parametrit. Tärkeimpänä niistä on solmupisteen rooli verkossa. DC-jakeluverkon stabiilisuuden kannalta lähes kaikki parametrit liittyvät toisiinsa. Esimerkiksi verkon jännitteen laskiessa tulee verkossa olla selvillä, mitkä solmupisteet voivat syöttää tehoa lisää verkkoon ja mitkä pudottaa kuormaa. Jotta kaikki tämä tapahtuisi ja eri osapuolet toimisivat yhdessä, on solmupisteillä oltava jatkuva tieto sen kuormien ja tuottajien sen hetkisistä potentiaaleista ja haluista osallistua verkon säätöön. Lisäksi myös tällaisissa tapauksissa varmasti rahalliset hyvitykset tulisi säätää sähkömarkkinalakiin, ja laskutuksen toteuttamiseksi solmupisteiden tulisi olla selvillä kunkin kotitalouden osuudesta. Kotitaloudet olisivat tätä kautta yhteydessä jakeluverkkotason energian hallintaan.

Hajauttamalla ohjausta ja tiedonkeruuta tällaisen monimutkaisen järjestelmän toteuttamisen mahdollisuudet paranevat, eikä kaikkea dataa tarvitse lähettää tietoliikennehierarkian ylimmälle tasolle. Solmupisteiden fyysinen ja luonnollisin sijoituspaikka olisi jo olemassa olevat katujakamot, joista olisi jatkuva tietoliikenne-yhteys sekä siihen liittyviin kotitalouksiin että ylemmälle tasolle. Tällöin kotitalouksien tulisi ainoastaan olla yhteydessä lähistöllä sijaitsevaan jakokaappiin ja säästettäisiin tietoliikenneinfrastruktuurissa.

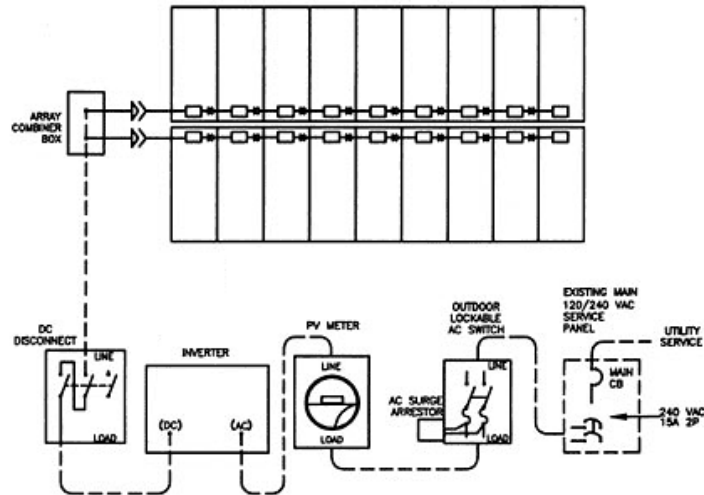
### 7.3.4 Kuluttajatasoenergian hallinta

Kuluttajatasolla energian hallinnalla pyritään lähinnä saavuttamaan taloudellista hyötyä sekä myös voidaan parantaa sähkön laatua. Tuottajien energian hallinnalla voidaan taas optimoida tuotantoa ja siirtää tuotetun energian myyntiajankohtaa. Yksittäisten kuluttajien ja tuottajien vaikutus koko verkon toimintaan on vähäinen, mutta kuitenkin kollektiivinen eli jokaisen tulee käyttäytyä samalla tavoin.

Kuluttajien ja tuottajien tasapuolinen toiminta ja kohtelu voidaan toteuttaa tehokkaasti edellisessä luvussa 7.3.3 mainittujen solmupisteiden älykkyyden avulla. Kuluttajatasolle tulisi kehittää yhtenäisen standardin mukainen liityntälaitteisto, joka olisi kykenevä kommunikoidaan solmupisteen kanssa ja sitä olisi myös mahdollista ohjata sekä automaattisesti että manuaalisesti. Laitteiston eri toiminnallisuuksia olisivat ainakin:

- rakennuksen sisäisten kuormien ohjaus ja priorisointimahdollisuus
- yhtenäisen standardin mukainen ohjausmetodi
- energiavaraston liitännämahdollisuus ja ohjaus
- hajautetun tuotannon liitännämahdollisuus ja ohjaus
- automaattinen sekä manuaalinen kuormien ja tuotannon määrittely
- katkaisija sekä mittausjärjestelmä ja releistys
- käyttöliittymä
- rakennuksen energian hallinta mahdollisessa saarekekäytössä DC-verkon kaatuessa.

Normaalien kotitalouksien liityntälaitteille hinnat ovat vielä nykypäivänä verrattaessa hyvin suuria. Lopullisen laitteiston hintaa nostaa etenkin vaatimus toimivasta ohjauksesta ja käyttöliittymästä. Yhdysvalloissa on jo olemassa myynnissä laitekokonaisuuksia, jotka sisältävät kaiken tarvittavan hajautettuun energian tuotantoon. Paketteihin kuuluu aurinkopaneelit ja asennustuet, kaapelit, DC-katkaisija, vaihtosuuntaaja, ylijännitesuoja, mittarit, maadoitukset ja verkkoerotin, josta voidaan valita joko saareke tai verkkokäyttö. 5,1 kW:n laitteisto maksaa noin 33 k\$, joka on noin 25,88 k€ (kurssi: EUR/USD 1,2748, 12.7.2006, Kauppalehti). Laitteistoon on lisäksi mahdollista liittää energiavarasto, joka luonnollisesti nostaa hintaa edelleen. Toisaalta tällaisten järjestelmien kaupallistuminen jo tässä vaiheessa luo tulevaisuudelle hyvää pohjaa. Ainoastaan komponenttien hinnat tulisi saada alas, joka voitaisiin saada aikaiseksi tulevaisuudessa nousevilla tuotantovolyyymeilla ja kilpailun lisääntymisellä. [56]

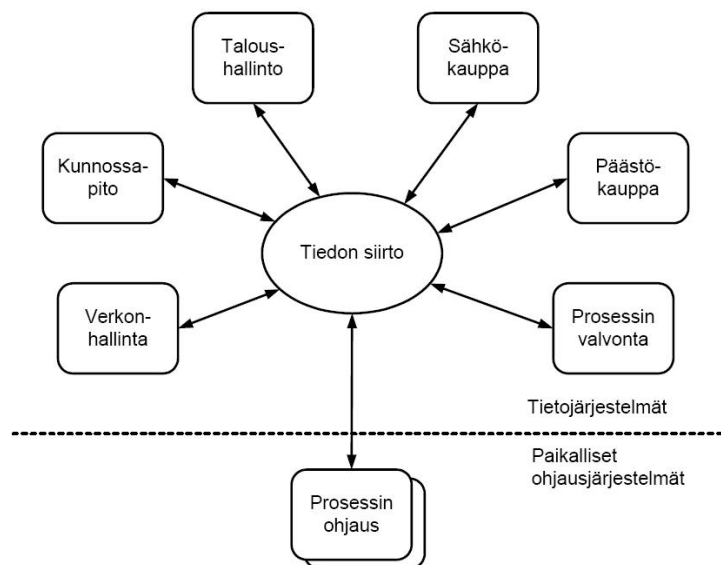


Kuva 7-3. Amerikkalaisen laitetoimittajan kytkentäkaavio aurinkopaneelin liityntälaitteesta jakeluverkkoon. [56]

## 7.4 Tiedonsiirto

### 7.4.1 Yleistä

Tiedonsiirron merkitystä hajautetun tuotannon energian hallinnassa on vaikea korostaa liikaa. Oikeastaan koko järjestelmän virheetön toiminta ja sen tarjoamat palvelut perustuvat tehokkaaseen ja toimivaan tiedonsiirtoverkostoon. Sen tehtävänä olisi toimia linkkinä eri toiminnallisten kokonaisuuksien ja paikallisten ohjausjärjestelmien välillä.



Kuva 7-4. Hajautetun tuotannon energian hallinnan kokonaisuuksien yhteys prosessien ohjaukseen tiedonsiirron välityksellä. [57]

Toimivan tiedonsiirtojärjestelmän toteuttaminen tulee olemaan haasteellinen tehtävä tulevaisuudessa implementoitaessa hajautettua tuotantoa ja energiavarastoja nykyisiin energiajärjestelmiin. Perusedellytyksenä tiedonsiirron tulisi selviytyä verkon hallinnasta sekä kunnossapidolle tarjottavista laitetiedoista.

Hajautetussa energiajärjestelmässä pienten resurssien sijaitessa kaukana toisistaan tarvittaisiin langatonta tiedonsiirtoa, jotta välttyttäisiin suurilta investoinneilta tiedonsiirtoväyliin. GPRS-tekniikka ei ole riittävän nopea hajautettujen energiajärjestelmien hallintaan, eikä UMTS-tekniikkaan siirtyminen tule tapahtumaan kovinkaan nopeasti. Tämän vuoksi Internetin hyödyntäminen on houkutteleva vaihtoehto, mutta sen tietoturva ja tietoliikenne ratkaisut eivät tällä hetkellä ole välttämättä riittäviä reaaliaikaiselle prosessinohjaukselle, vaikkakin sen suorituskyvyllä voitaisiin hoitaa esimerkiksi hälytyksiä ja erilaisten parametrien valvomista.

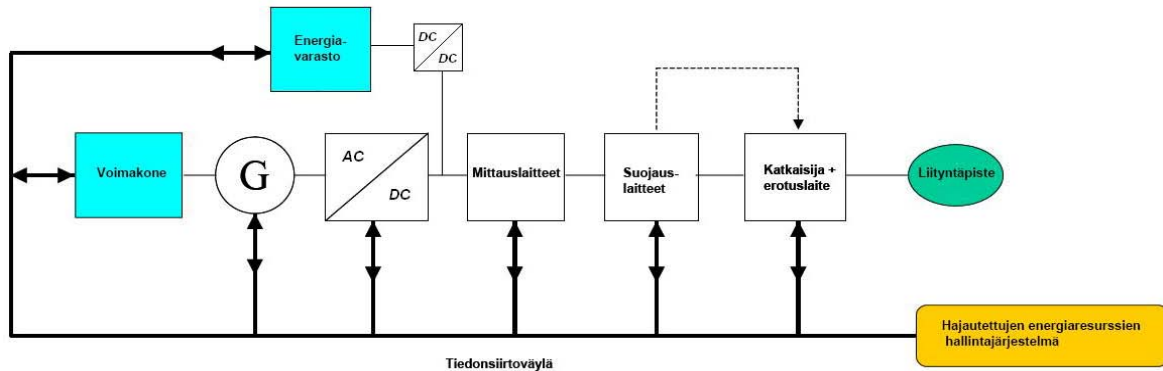
Jos hajautetun energiajärjestelmän tiedonsiirtoon käytettäisiin yleisiä tietoliikenneverkkoja, voitaisiin hyödyntää esimerkiksi VPN-tekniikkaa, jolla voidaan saavuttaa riittävä tietoturvasävy. IP-osoitteiden rajallisuuden vuoksi ollaan siirtymässä IPv4:stä IPv6:een, jolla mahdollistetaan suurempi IP-osoiteavaruus sekä useiden koneiden liittäminen yhden IP-osoitteen alle Anycast-tekniikalla. Lähettämällä tieto yhteen IP-osoitteeseen voidaan ohjata useita kohteita samanaikaisesti. Kahdentamalla laitteita tällä tavoin voidaan tiedonsiirron luotettavuutta parantaa.

Hajautetun tuotannon kannattavuuden ehtona on tehokas ja edullinen liityntä sähkökaupan hyödyntämiin tietojärjestelmiin, mikä mahdollistaisi toimimisen sähkömarkkinoiden ja päästöoikeuksien kanssa. Lisäksi tietojärjestelmän toteutuksen tulisi mahdollistaa prosessien etävalvonnan ja ohjauksen. Energiajärjestelmien pitoajat ovat yleisesti hyvin pitkiä, mikä loisi vaatimuksen myös tietojärjestelmän ylläpidettävyydelle. Perusjärjestelmä tulisi suunnitella vähintään 20 vuoden käyttöjaksolle, sekä ottaa huomioon tulevaisuuden todennäköinen ohjelmistokehitys. Laitteistoratkaisut tulisi suunnitella siten, että uusien versioiden yhteensopivuus ja käyttöönotto ei välttämättä edellyttäisi kaikkien järjestelmien uusimista samaan aikaan. Myös laajennettavuuden tulisi olla yksi keskeisistä suunnittelukriteereistä, jotta uusien sovellusten lisääminen jälkikäteen olisi suhteellisen edullista. [57]

## 7.4.2 Liityntälaitteiston tiedonsiirto

Pääosa tiedonsiirron toimintavarmuudesta koostuu liityntälaitteiden eri komponenttien kommunikoinnista hallintajärjestelmän kanssa. Tämä tapahtuu tiedonsiirtoväylän välityksellä, joka yhdistää liityntälaitteen ja hallintajärjestelmän. Tiedon ja ohjauksikäskyjen vaihto osapuolten välillä on kaksisuuntaista, jotta käyttäjien valinnanvapaus säilyisi, mistä mainittiinkin jo kohdassa 7.3.4.

Alla on havainnollistettu periaatetasolla liityntälaitteen komponenttien kytkennät (Kuva 7-5). Kaikki ovat yhteydessä tiedonsiirtoväylään, ja osalla komponenteista voi olla omia keskinäisiä yhteyksiä, kuten esimerkiksi suojauslaitteiden ja katkaisijan yhteinen nopea toiminta edellyttäisi. Kuvasta puuttuu varsinainen keskusyksikkö, joka hallitsisi laitteen sisäistä ja ulkoista tiedonkulkua ja jonka tehtävänä olisi myös toimia lähettimenä.



Kuva 7-5. Hahmotelma liityntälaitteen ja DC-jakeluverkon hallintajärjestelmän välisestä tiedonsiirrosta. Kuva muokattu lähteestä [57].

### Laitteiden liitännät

Jotta laitteesta saataisiin irti maksimaalinen hyöty, tulee sillä olla erilaisia liitännät pintoja muihin järjestelmänosiin ja -käyttäjiin. Alla olevassa listassa on esimerkkejä mahdollisista liityntäpintoista ja niiden toimintatarkoituksista:

- Käyttäjiliitäntä
  - ainoastaan tärkeimmät laitteiden suuret ja hälytykset ovat luettavissa
  - mittarit, merkkivalot, painikkeet, mahdollinen tietokone-etäyhteys
  - käyttö mahdollista yleisten tietoverkkojen avulla
- Huolto- ja ylläpitoliitäntä
  - mahdollisuus vikojen diagnosointiin esim. huoltomiehen tietokoneella
  - mahdollisuus myös laitteen manuaaliseen konfigurointiin
- Sähkömittariliitäntä
  - suureiden lukeminen järjestelmään
  - tuki kaukoluennalle
- Laitteistoväylä
  - digitaali- ja analogilähtö ja -tulo, liitännät eri komponenteille
- Tietojärjestelmäliitäntä
  - mahdollisuus käyttää erilaisia protokollia liityttäessä eri tietojärjestelmiin.

## **Plug&Play-liityntä**

Kuten jo englanninkieliset sanat kuvaavat, tarkoitetaan Plug&Play-liitynnällä sitä, että kun laite kytkettäisiin tiedonsiirtoväylään, olisi se kykenevä hakemaan tarvittavat parametrit ja ehkä myös sovellukset väylän kautta. Laite konfiguroisi itsensä verkkoon, eikä käyttäjän tarvitsisi omata vankkaa sähkö- ja tietotekniikka-alan osaamista.

Verkon rakenteen muuttuessa ja kenties tuotannon lisääntyessä on laitteiden parametrit konfiguroitava aina uudelleen. Tämä johtuu siitä, että verkossa olevien tuotantoyksiköiden vaikutukset ovat liityntäpistettä laajemmat. Plug&Play-liityntää ei kuitenkaan kovin helposti voida sallia, sillä se merkitsee liityntälaitteiden liittämistä verkkoon milloin tahansa. Tarvittaisiin hyvin pitkälle kehittyneet standardit ja jonkinlainen ennakkohyväksyntäjärjestelmä. Kohdassa 7.3.1 mainitun kaltaiselle DC-jakeluverkolle Plug&Play-liityntä voisi toimia, jos jakeluverkko koostuisi pienistä osista – mikroverkoista, jolloin parametrien hallinta olisi todennäköisempi yksinkertaisempaa kuin suoraan pääverkkoon liittyvillä laitteilla. [57]

### **7.4.3 Käyttöliittymät**

Energian hallinnan tiedonsiirron yhtenä suurena kehityskohteena voidaan pitää käyttöliittymien luomista eri hajautetun energiajärjestelmän osapuolille. Käyttöliittymiä tulisi olla sekä maallikoille että järjestelmävastaaville. Käyttöliittymiä hyödynnettäisiin myös huoltotoimenpiteissä ja kaukokäytöissä. Liian vaikea käyttöliittymien omaksuminen ja siitä aiheutuva koulutuksen tarve tulisi minimoida.

Tästä voidaan päätellä, että käyttöliittymiä tulee muodostumaan eri järjestelmätasoisille ja eri käyttäjien vaatimustasoisille. Käyttäjien vaatimustasot ja oikeudet määräävät, mitä tietoa kukin käyttöliittymä saa tietokannoista ja mitä asetuksia se tarjoaa käyttäjällä muokattavaksi. Paikalliset käyttöliittymät voivat olla melko yksinkertaisia ja tarjota ainoastaan oleellisimmat tiedot kohteesta. Laitteisiin voitaisiin kuitenkin asentaa liityntä yksityiskohtaisempien asetusten muutoksiin, esimerkiksi vikadiagnoosia varten. Käyttöliittymille voidaan määritellä kolme pääasiallista toimintakokonaisuutta, joiden toiminnallisuuden määrät riippuvat paljolti kyseisen liitynnän ominaisuuksista ja asiakkaan tarpeista: normaalintilan kulutus, ”päälle ja pois” -kytkentä ja -palvelut, tuotannonyksikön mahdollistama liiketoiminta ja vika- ja korjaustilanteiden toiminnot.

Käyttöliittymien mahdollistama tiedonsiirto ihmisen ja järjestelmän välillä edellyttäisi keskitetyn palvelimen käyttöönottoa, jonka tehtävänä olisi hallita käyttäjän ja järjestelmän välistä keskustelua sekä integroida yhteen eri osajärjestelmiä. Palvelimen muokattaessa tiedon eri järjestelmänosista yhtenäiseen muotoon se mahdollistaisi tehokkaiden ja



monipuolisten palveluiden tarjoamisen käyttäjille, esimerkiksi käyttäen XHTML-selaintekniikkaa. Näin käyttöliittymät saataisiin toteutettua jo valmiina olevin web-teknologioin. [57]

## 8. Liiketoimintamahdollisuudet

### 8.1 Yleistä

Pääasiallisesti koko energia-ala koostuu energiateknologiasta ja energialiiketoiminnasta. Energialiiketoiminnanmahdollisuuksilla tarkoitetaan energia-alan muodonmuutokseen liittyvien uusien toimintojen ja palvelujen hyödyntämistä. Kansantaloudellisesti ajatellen hajautetut energiajärjestelmät luovat uusia työpaikkoja ja liiketoimintamahdollisuuksia. Energiateknologia käsittää alalla käytettävien palveluiden ja laitteiden tarjoamien yritysten toimintaa. Energialiiketoiminta taas käsittää raaka-aineiden jalostukseen ja energiaketjuihin liittyvän liiketoiminnan.

Tulevaisuudessa palveluiden ulkoistaminen tulee yleistymään entisestään hajautettujen energiajärjestelmien myötä. Palveluiden tehostaminen yleistyy tuotteiden myynnin eri vaiheissa ottaen huomioon niiden koko elinkaaren, joka näkyy esimerkiksi systeemitointuksien kasvuna. Lisäksi syntyy erittäin paljon erilaisia operaattori- ja valvontarooleja, joiden koko ja liiketoimintastrategiat voivat vaihdella runsaastikin. Erityisen mielenkiintoiseksi muodostuu tilanne, jossa perinteisten sähköyhtiöiden tulee reagoida muuttuvaan tilanteeseen. Sähköyhtiöillä on vaihtoehtoina joko ulkoistaa hajautettuihin energiajärjestelmiin liittyvä liiketoiminta keskittymällä ainoastaan sähkönsiirtoon ja vähittäismyyntiin tai luomalla omia palveluita ja tulosityksiköitä osaksi muuta liiketoimintaa. Sähköyhtiöiden kokemuksen, tietotaidon ja jo olemassa olevien järjestelmien vuoksi niiden ei ole luonnollisestikaan kannattavaa jättäytyä sivuun. Jokaisen sähköyhtiön tulee kuitenkin miettiä tarkkaan ulkoistussuunnitelmat ottaen huomioon sen toimintaympäristö, -strategia ja markkina-asema.

### 8.2 Toimijat

Energia-ala on laaja, ja sen tehokas toiminta vaatii runsaasti eri osapuolia. Pääasiallisiin osapuoliin kuuluu laite-, systeemi- ja raaka-ainetoimittajat, alihankkijat, tuottajat, kuluttajat, rahoittajat, omistajat, operaattorit ja viranomaiset, joita tässä yhteydessä voidaan kutsua toimijoiksi.

Hajautetun energiantuotannon yleistyessä toimijoiden määrä luonnollisesti kasvaa lähinnä sen vuoksi, että syntyy uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Toimijat sijoittuvat omalla paikalleen energiajärjestelmän hierarkiaketjussa, mutta käytännössä ne ovat usein jossain määrin riippuvaisia toisten toimijoiden palveluista, jolloin yhteistyö on välttämätöntä. Toivottavaa olisi myös, että useita toimijoita olisi kilpailemassa samalla talousalueella, jolloin lisääntynyt kilpailu varmistaisi palveluiden laadun ja asiallisen hintatason.

Seuraava taulukko (Taulukko 8-1) tuo esille uusia mahdollisia toimijoita sekä perinteisen keskitetyn energiajärjestelmän olemassa olevien toimijoiden mahdollisesti muuttuvia vastuita. Toimijoiden kuvaukset on laadittu siten, että ainoastaan niiden pääpiirteet ja niiden paikka energialiiketoiminnan arvoketjussa tulee selville. Taulukossa toimijat on pyritty esittämään pienimuotoisimmista liiketoiminnoista laajempiin kokonaisuuksiin.

*Taulukko 8-1. Hajautetun energiajärjestelmän edellyttämiä ja jo olemassa olevia energialiiketoiminnan toimijoita. Taulukko muodostettu lähteen [57] tekstistä.*

Toimija	Tehtävä	Toimijan kuvaus	Edellytykset
Energiaresurssin omistaja	energian tuotanto	yksityinen tuottaja, kotitalous, yhteisö	tuotantoyksikkö
Energiakonsultti	esisuunnittelun konsultointi	konsulttitoimisto	tietotaitoa, puolueettomat mielipiteet
Integraattori	organisointi, suunnittelu, käyttöönotto	insinööri-toimistot, suunnittelijat, monialaiset yritykset	tietotaitoa, yhteyksiä eri toimijoihin
Huoltoyritys	monipuolinen huolto	huoltomies, huoltoyritys	tietotaitoa, käytännön osaaminen
Valvojat ja operaattorit	pienien prosessien valvonta	palveluyritykset, operaattoritoimintaan erikoistuneet yritykset	keskitetty valvomo, kaukodiagnostiikka
Paikallisen energiaverkon operaattori	alueellisten kokonaisuuksien valvonta	sähköyhtiöt, jakeluverkon haltijat, erilliset operaattoriyritykset	tiedonsiirto, energiantekniikka
Sähkön vähittäiskauppia	pienien energiaresurssien energian vähittäismyynti kootusti	vähittäiskauppia, sähköyhtiö	omia resursseja, tiedonsiirto, liiketoiminta osaaminen
Sähkömarkkinoiden tasevastaava osapuoli	sovittu ja toteutuneen taseen tasapainotus	suuri vähittäiskauppia, energiaresurssien hallintaan erikoistunut yritys	paljon resursseja, tiedonsiirto, liiketoiminta osaaminen
Sähköjärjestelmän järjestelmävastaava	siirtoverkon tasapaino, ohjattavien resurssien organisointi, toimiminen säätösähkömarkkinoilla	siirtoverkko-operaattori	nopeat resurssit, siirtoverkon hallinta, laaja alan tietotaito

DC-verkkojen käyttö taajaman sähkönjakelussa toisi joitakin muutoksia hajautetun energiajärjestelmän toimijoiden muodostamaan energialiiketoimintaan. Lähinnä se loisi mahdollisuuksia lisäpalveluiden ja -tuotteiden tarjoamiselle. Lisäksi syntyisi lisää tarvetta uusien DC-laitteiden tuotekehitykselle ja lopulta varsinaiselle valmistamiselle.

### 8.2.1 Palvelut ja tuotteet

Kuluttajien kannalta oleelliset DC-jakeluverkon tarjoamat hyödyt ja muutokset näkyvät sähkön laadussa. Sähkösäilytykselle DC-jakeluverkko tarjoaa vastaavasti mahdollisuuksia tarjota erilaisia lisäpalveluita. Erityisesti yleisessä keskustelussa on ollut eri sähkön laatuun hinnoittelu. Huolellisella DC-verkon suunnittelulla, tarkoin harkituilla energiavarastojen sijoittelulla ja oikealla hinnoittelulla sähkösäilytykset voivat saada lisätuotteita, koska sähkön laatu saadaan kohdennettua paremmin loppukäyttäjille.

Kaikilla käyttäjillä ei välttämättä ole intressejä maksaa ylimääräistä paremmasta sähkön laadusta, vaan heille riittää nykyinen tilanne. Joillekin asiakkaille taas voi olla ensiarvoisen tärkeää katkeamaton sähkön syöttö tai erittäin sinimuotoinen jännite, jolloin he ovat valmiita investoimaan sähkön laatuun. Tällöin sähkösäilytyksen tehtävänä on toimia ja investoida energiavarastoihin ja muihin sähkön laadun hallintalaitteisiin.

DC-verkko luo mahdollisuuden muodostaa hinnasto eri sähkönlaaduille. Sähkösäilytys perii suurempaa korvausta vaativimmilta asiakkailta ja kattaa sähkön laadun hallinnan investointikulut sekä myös ottaa mahdollista lain sallimaa liikevoittoa. Tämä on erityisen kiinnostavaa käytettäessä DC-jakeluverkkoa, koska tasasuunnattaessa vaihtosähkö siitä voidaan teoriassa muokata vapaasti eri laatuja asiakkaiden tarpeiden mukaisesti. Lisäksi huonoimmankin laadun toimitusvarmuus olisi korkeampi verrattaessa nykyiseen sähkönlaatuun, koska varsinaisen DC-väylän varmennus energiavarastoilla ja hajautetulla tuotannolla olisi DC-jakeluverkkokonseptissa itsestäänselvyys.

Eri sähkönlaatuasteista kiinnostuneita käyttäjiä on runsaasti. Käyttäjiä on varmasti mahdotonta täysin luokitella, koska yksittäisten käyttäjien intressit voivat erota paljonkin toisistaan, sekä vuosien varrella rakennusten käyttötarkoitukset voivat muuttua. Taulukko 8-2 tuo esille eri sähkönlaatuasteille mahdollisesti sopivia käyttökohteita. Siinä on pyritty vertailemaan DC-verkon vastaavuuksia AC-verkon sähkönlaatuasteisiin, mikä on mahdollista AC-verkkoon asennettavalla sähkönlaatuasemalla.

Taulukko 8-2. Sähkönlaatuasteojen käyttökohteet ja hinnan muodostus. (Perustuu osittain viitteeseen [58])

Sähkölaatuasteo (AC) DC	Käyttökohteet	Lisätietoja	Hinta
(Perussähkön-syöttö) DC-varmennettu syöttö	normaalit kotitaloudet, omakotitalot, rivitalot ja kerrostalot	Loppukäyttäjien perussähkönlaatu on DC-jakeluverkossa nykyistä parempi	Normaali
(Varavoima) Käyttäjä-kohtainen	puutarhat, kasvihuoneet, maatilat, vesilaitokset ja pumppaamot, kaukolämmön jakelu, läppäsillat	Käyttäjäkohtainen varavoima voidaan kytkeä vaihtosuuntaajan taakse suoraan käyttökohteeseen	Normaali + varavoiman investointikustannukset
(Off-line UPS) AC-puolelle	kotitoimistot, väestösuojat, rajanylityspaikat, rautateiden automatiikka, majakat, liikennevalot, tasoristeykset, tornien vilkkuvalot	Haluttaessa varmentaa sähkönsyöttöä lisää voidaan UPS-laitteisto kytkeä suoraan käyttökohteeseen	Normaali + UPSin investointikustannukset
(Off-line UPS + varavoima) Käyttäjän AC-puolelle	poliisiasemat, virastot, toimistot, pankit, ravintolat, koulut, kulttuurirakennukset, vanhainkodit, maakaasu-verkon kompressorit, kauppakeskukset, marketit, liikuntakeskukset, GSM-tukiasemat	Edelliset kohdat yhdessä, erittäin varma sähkön syöttö	Normaali + investointikustannukset UPS, varavoima
(Sähkön laadun hallinta + varavoima) Varsinaista SLH:ta ei tarvita + käyttäjän oma	sairaalat, terveyskeskukset, PK yritykset – kriittisiä tai häiriöitä tuottavia prosesseja, ATK-keskukset,	Käyttäjäkohtainen varavoima, sähkön laadun hallinta ainoastaan kuorman tehonvaihteluiden osalta, DC-verkossa ei yliaaltoja	Normaali + investointikustannukset energia-varasto, varavoima

Käyttökohteiden sijaitessa sähköyhtiön DC-jakelualueilla on asiakkailta mahdollista esimerkiksi tilata varmennettua sähköä tietyille ajalle syystä tai toisesta. Syynä voi olla vaikka toimistorakennuksissa tapahtuvat tärkeät neuvottelut tai jonkin tehtaan elintärkeän prosessin sähkön saannin varmistaminen. Sähköyhtiön omistuksessa olevilla siirrettävillä energiavarastoilla yhtiö voi helposti nostaa toimitusvarmuutta paikallisesti. Tulevaisuudessa on teoriassa mahdollista kaukokäytön avulla muuttaa DC-verkon kytkentöjä siten, että tietyn alueen käyttäjät saavat ylivarmennettua sähköä, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi kytkemällä yhteen verkon osia, joissa sijaitsee hajautettua tuotantoa sekä energiavarastoja.

Esim. Japanissa Sendain mikroverkkojärjestelmässä tuotetaan asiakkaille kuutta eri sähkön laatua, joista yksi on keskeytymätön tasavirtajakelu, jossa tasavirtajärjestelmä on toteutettu käyttäen kaupallisia tuotteita. Tasajännitejärjestelmä kiinteistöjen täydellisenä tai osittaisena jakelujärjestelmänä poistaisi lukuisten laitteistokohtaisten vaihtojännite-tasajännitemuuntimien tarpeen ja siten myös osaltaan edistäisi kiinteistöjen energiatehokkuutta.

## 8.2.2 Hajautetun tuotannon ja DC-jakelun aiheuttamat muutokset

Energialiiketoiminnan kannalta erityisen tärkeää on sähkömarkkinalain uudistaminen ja sen mukauttaminen hajautetun tuotannon edellyttämin perustein. Lisäksi tulisi ottaa huomioon sähköverkon ja etenkin jakeluverkkojen perusrakenteiden muutokset (DC-verkot), jotka tarjoavat paljon uusia mahdollisuuksia esimerkiksi verkkoliitännöille ja joustavamman tavan hinnoitella myytävää sähköä. Sähkömarkkinalain tulisi tukea uusia eteenpäin vieviä ratkaisuja, mutta myös samalla asettaa tiukat rajat, jotta hajautetun tuotannon ja energiavarojen liittäminen verkkoon säilyisi kontrollissa, jolloin välttyttäisiin jakeluverkkojen väärinkäytöksiltä.

Hinnoitteluperusteiden muuttuminen tulee tapahtumaan etenkin silloin, kun erilaisten lisäpalveluiden ja sähkönlaatutasojen tarjoaminen on mahdollista. Hinnoitteluperusteiden laatimista ohjaa myös omalta osaltaan sähkömarkkinalaki. Mahdollisten DC-jakelualueiden ongelmaksi voi muodostua päättäminen jakelukokonaisuuksien ja asiakkaiden välisistä rajapinnoista. Asiakkaat eivät välttämättä ole valmiita investoimaan kalliisiin suuntaajan, katkaisijan ja etähallintalaitteiden kokonaisuuksiin, vaan kannattavat perinteistä liityntää.

Energia-alan toimijoiden lisääntyminen aiheuttaa muutoksia sähkömarkkinalakiin, jossa on määritelty sähköyhtiöiden vastuut ja velvollisuudet. Lisäksi lakiin tulisi määrittellä mahdollisten uusien toimijoiden vastuita. Jatkuvan muutoksen aikana laista on vaikea tehdä riittävän seikkaperäistä ja sitä tulisikin soveltaa yhteisymmärryksessä.

## 9. Case-tapauksien tarkastelu simuloiden

### 9.1 Johdanto

Simulointien tarkoituksena on havainnollistaa edellä mainittuja DC-mikroverkkojen suomia etuja sähkön laadun hallinnassa. Tarkastelun kohteena on etenkin syöttävän AC-verkon puolella tapahtuvat katkokset, kuten jännitekuopat, oikosulut sekä pitempiaikaiset katkokset. Simuloinnit tehtiin PSCAD/EMTDC<sup>®</sup>-ohjelmalla, joka soveltuu erittäin hyvin sähköverkkojen simulointiin. Simulointeja toteutettiin kahdessa case-tapauksessa.

Ensimmäisessä case-tapauksessa simuloitu konsepti on pienjänniteasiakkaille tarkoitettu DC-mikroverkko. Pienjännite-DC-mikroverkko on varmennettu keskitetyllä energiavarastolla. Pienjännite-DC-mikroverkossa on myös integroituna yksittäisen käyttäjän mikroverkko. Simuloinneista tulee ilmi, kuinka energiavarastoilla varustetulla DC-mikroverkolla voitaisiin esimerkiksi välttää loppukäyttäjillä esiintyvät alle 3 sekunnin käyttökatkokset kokonaan.

Toisessa case-tapauksessa simuloitu konsepti on keskijänniteasiakkaille tarkoitettu DC-mikroverkko, jossa AC-verkon syöttö katkeaa kokonaan useiksi sekunneiksi tai jopa tunneiksi. Kuormien tehontarve on tuotettu keskitetyllä energiavarastolla ja varavoimageneraattorilla. Energiavaraston tehtävänä on antaa generaattorille riittävä aika käynnistymiseen, jotta se olisi valmis tyydyttämään kyseisen DC-mikroverkon tehontarpeen vian ajaksi.

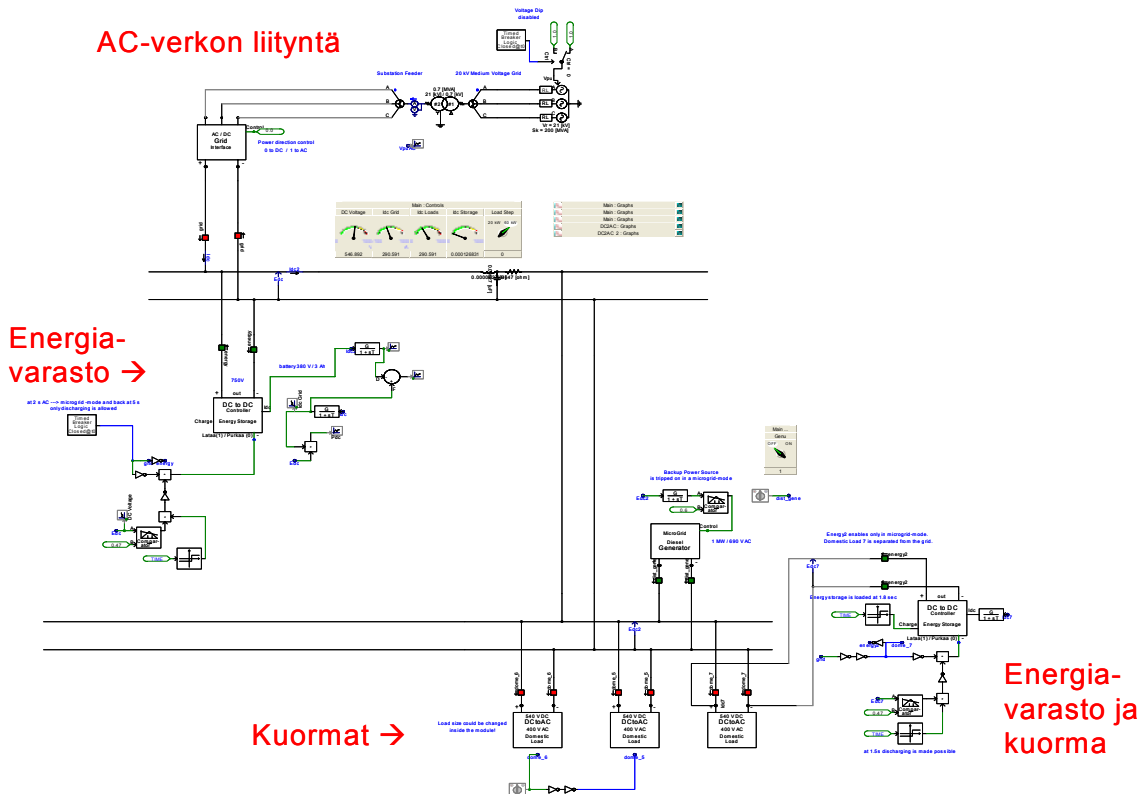
Tuloksien tarkastelunäkökulma on lähinnä preliminäärinen ja suuntaa antava. Simuloinneista on mahdotonta saada yleispäteviä totuuksia, koska niiden todellisuudenvastaisuuden todistaminen olisi vaikeaa. Tuloksista voidaan kuitenkin selkeästi nähdä DC-mikroverkkokonseptin potentiaali sähkön laadun parantamiseksi. Konseptit tuovat myös esille kaksi DC-mikroverkon periaatteellista toteutustapaa jännitetasojen ja verkon käytön osalta.

### 9.2 Konseptien määrittely

#### 9.2.1 Case 1 – Energiavarastolla varmennettu pienjänniteasiakkaiden DC-verkko

Pienjänniteasiakkaille tarkoitettun DC-verkon konseptin lähtökohtana oli saada kertymään asiakkaille mahdollisimman vähän kustannuksia. Tämän vuoksi pyrittiin säilyttämään 400 V AC -jännitesyöttö asiakkaille. Tällöin asuntojen sisäisiä järjestelmiä ei täytyisi muuttaa lainkaan. Koska AC/DC-suuntaajien tyypillinen muuntosuhde AC-puolen pääjännitteen ja DC-jännitteen välillä on tyypillisesti 1.35, valittiin DC-verkon nimellisjännitteeksi 540 V.

DC-verkon pääsyöttö toteutettiin sekä AC/DC-suuntaajalla ja DC/DC-katkojalla. DC/DC-katkoja tarjoaa hyvät virran ja jännitteen säätöominaisuudet. DC/DC-katkojasta johtuen pääsyötössä käytettiin 21 kV / 0.69 kV -muuntajaa, jolloin AC/DC-suuntaajan jälkeinen jännite oli 930 V DC. Tämän jälkeen se laskettiin DC/DC-katkojalla arvoon 540 V DC.



Kuva 9-1. Simuloidun pienjänniteasiakkaiden DC-verkon simulointipiirin ulkoasu – PSCAD/EMTDC®.

Kuva 9-1 esittää simuloitavan DC-verkon ulkoasun, josta voidaan nähdä pääkomponenttien sijoittelu. Kuormia syötetään 100 m:n kaapelin kautta. Energiavarastot on kytketty DC-verkkoon DC/DC-katkojen kautta, jotka nostavat niiden jännitteen 250 V:sta 540 V:iin. Energiavarastojen toimintaa ohjataan nimellisjännitteen avulla. Mikäli nimellisjännite tippuu alle ohjauksen asetteluarvon, syöttää energiavarasto tehoa verkkoon. Tässä simulointikonseptissa kuitenkin huomattiin, että AC-verkossa esiintyvien lyhyiden jännitehäiriöiden heijastuminen DC-verkon jännitteeseen oli erittäin vähäistä, jolloin energiavarastot eivät reagoineet häiriöihin lainkaan. Tämä johtui osaksi siitä, että AC/DC-suuntaajan käytettiin lisäksi DC/DC-katkoja ja niiden välipiiriin kytkettyä suhteellisen suurta kondensaattoria.

Pääsyötön katkaisijan toimiessa saa energiavarasto tiedon siitä, että sen on syötettävä kuormia itsenäisesti. Lisäksi eräs kuormista saa myös saman tiedon ja eroaa DC-



verkosta oman energiavaraston varaan. Vian ollessa ohi AC-verkossa palataan pääsyötön varaan. Irta kytkeytynyt kuorma kytkeytyy takaisin verkkoon. Energiavarastoja estetään syöttämästä tehoa verkkoon samanaikaisesti, kun pääsyöttö kytetään takaisin. Näin voidaan ehkäistä pääsyötön ja energiavarastojen välistä reagointia keskenään. Lisäksi energiavarastot tulee ladata uudelleen täyteen.

Tässä simuloinnissa kuormien kooksi valittiin 50 kW. Se on enemmän kuin tyypillisen omakotitalon liityntäteho. Pienjännite-DC-verkon konseptin ajatuksena on välttää asiakkaille koituvia kustannuksia. Siksi ajatus keskitetystä DC/AC-suuntaajasta katujakomoissa voisi olla yksi kustannustehokas ratkaisu. Asiakkaat voisivat valita AC- tai DC-syötön välillä ja silti molemmat syötöt olisi varmennettu DC-verkolla. Seuraavaan taulukkoon on kerätty simuloinnissa käytetyt parametrit pienjänniteasiakkaille tarkoitetulle DC-verkolle.

*Taulukko 9-1. Simuloidun pienjänniteasiakkaiden DC-verkon parametrit pääpiirteittäin.*

Mikroverkon osa	Kuvaus	Kuvaus
AC-verkko	$U_n = 21 \text{ kV}$	$S_k = 200 \text{ MVA}$
Muuntaja	21 kV / 0.69 kV	$S_n = 0.4 \text{ MVA}$
DC-verkko	$U_{dc} = 540 \text{ V}$	$I_n = 740 \text{ A}$
Kuormat	$P_{load} = 3 \times 50 \text{ kW}$	AC puolella
Keskitetty energiavarasto	$U_{dc} = 250 \text{ V}$	500 A ~ 3 sek.
Yksit. käyt. energiavarasto	$U_{dc} = 250 \text{ V}$	120 A ~ 3 sek.

### 9.2.2 Case 2 – Energiavarastolla ja varavoimalla varmennettu keskijänniteasiakkaiden DC-verkko

Keskijänniteasiakkaiden energiavarastolla ja varavoimalla varmennetussa DC-verkko-konseptissa on suunnittelun lähtökohtana pyritty välttämään sähkökatkokset täysin. Koska jo edellisessä kohdassa 9.2.1 simuloitiin DC-verkon toimintaa lyhyiden katkosten aikana ja niiden vaikutuksia loppukäyttäjien AC-jännitteeseen, keskitytään tässä kohdassa tuomaan esille DC-verkon mahdollisuuksia sähkön laadun parantamiseksi pitempiaikaisten useita tunteja kestävien katkosten aikana.

Pitempiaikaisen tehontarpeen tyydyttämiseksi tarvitaan luonnollisesti riittävästi varavoimaa. Varavoimaa voidaan tuottaa monin tavoin, mutta tässä tapauksessa sen on ajateltu olevan dieselgeneraattori, jonka käynnistyminen kestää n. 5 s. Koska generaattoria ei luonnollisesti käynnistetä kuin tarvittaessa pyritään käynnistykseen tarvittavana aikana DC-verkon tehontarve hoitamaan ison keskitetyn energiavaraston avulla. 5 sekunnin

kuluttua AC-syötön katkeamisesta varavoima kytkeytyy DC-verkkoon. Tässä simuloinnissa varavoima on kytkeytyneenä ainoastaan 5 s useiden tuntien sijaan, minkä jälkeen kaikki teho otetaan AC-verkosta, palataan normaaliin tilaan ja dieselgeneraattori sammutetaan.

*Taulukko 9-2. Simuloidun keskijänniteasiakkaiden DC-verkon parametrit pääpiirteittäin.*

Mikroverkon osa	Kuvaus	Kuvaus
AC-verkko	$U_n = 110 \text{ kV}$	$S_k = 2000 \text{ MVA}$
Muuntaja	110 kV / 21 kV	14 MVA
DC-verkko	$U_{dc} = 13.5 \text{ kV}$	$I_n = 840 \text{ A}$
Kuormat	$U_n = 10 \text{ kV}$	Pload = 3 x 2 ja 3 x 1 MW
Keskitetty energiavarasto	$U_{dc} = 7 \text{ kV}$	850 A ~ 5 sek.
Varavoimageneraattori	$U_n = 6.6 \text{ kV}$	$S_n = 12 \text{ MVA}$
Varavoiman muuntaja	6.6 kV / 21 kV	$S_n = 13 \text{ MVA}$

Taulukko 9-2 tuo esille keskijänniteasiakkaille tarkoitetun DC-verkon parametrit. Keski-jännite-DC-verkkoa syötetään 110 kV -verkosta 110 kV / 21 kV -muuntajan kautta. AC/DC-suuntaajan jälkeinen DC-jännite on 28,4 kV. Tämän jälkeen se on laskettu DC/DC-katkojalla 13,5 kV:iin. Näin saadaan kuormien AC-puolelle pääjännitteeksi 10 kV, jota on jonkin verran käytetty kaupunki- ja taajama-alueilla esim. Helsingin kantakaupungin alueella. Siten ei synny ylimääräisiä lisäkustannuksia esim. muuntajien ja suojauskomponenttien osalta, jos voidaan käyttää jo olemassa olevia tuotesarjoja.

Varavoimageneraattori syöttää tehoa verkkoon 6,6 kV / 21 kV -muuntajan kautta. Näin saadaan generaattori erotettua DC-verkosta galvaanisesti omaan muuntopiiriinsä, joka on suotavaa esimerkiksi generaattorissa mahdollisesti tapahtuvien oikosulkujen varalta. Lisäksi pienemmälle jännitteelle suunnitellut generaattorit ovat huomattavasti halvempia. Pohdittavaksi jää, olisiko halvempaa hankkia suurjännitegeneraattori ilman muuntajaa. Simuloinnin pääpaino on DC-verkon liityntälaitteiden toiminnassa ja itse verkon konseptin kehittämisessä. [62]

## 9.3 Simuloinnit ja tulokset

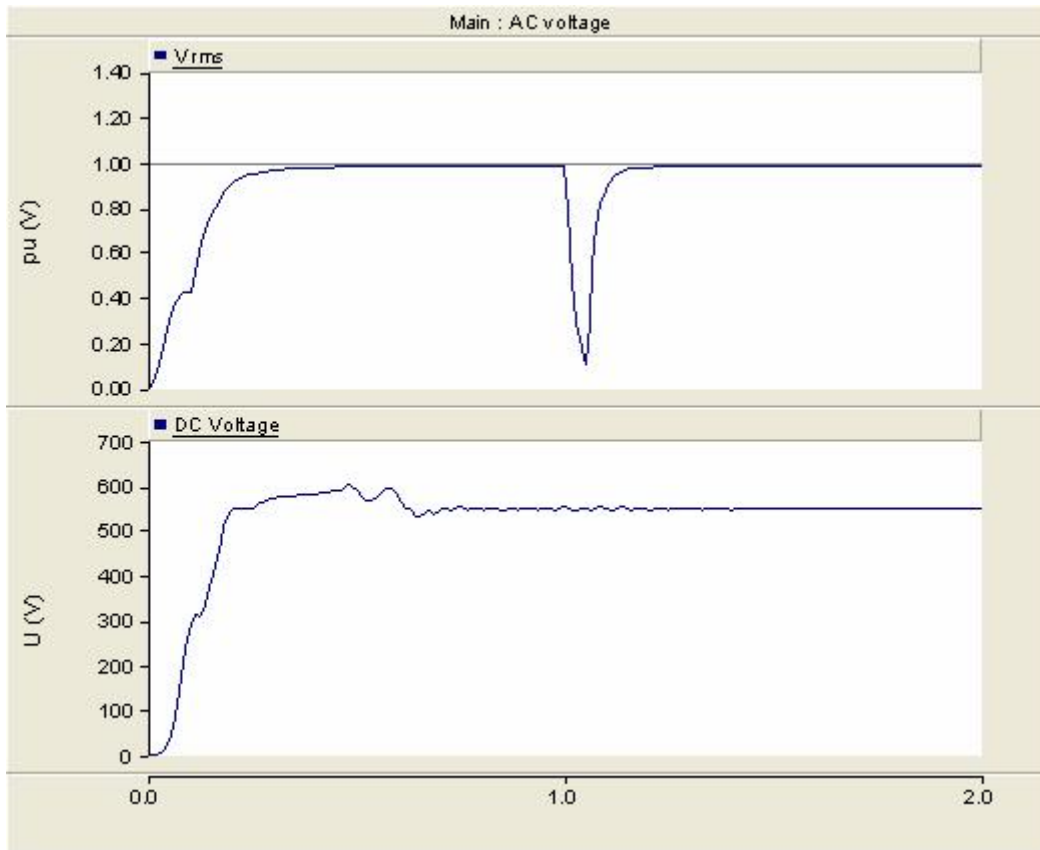
### 9.3.1 Case 1 – Energiavarastoilla varmennettu pienjänniteasiakkaiden DC-verkko

#### Käynnistys

Pienjänniteasiakkaiden DC-verkon käynnistys on simuloitu siten, että syöttävä AC-verkko, AC/DC-suuntaaja ja kuormien DC/AC-suuntaajat kytkeytyvät DC-verkkoon ajan hetkellä  $t = 0$  s. Kuva 9-2 tuo esille DC-verkon käynnistykseen kestävän ajan, joka kestää noin 1 sekunnin. DC-verkko on käynnistynyt, kun sen nimellisjännite 540 V on saavutettu ja järjestelmä on stabiloitunut. Kyseisillä verkon parametreilla käynnistyksessä ei esiinny mainittavia jännitteiden eikä virran ylilyöntejä. Kuva 9-5 tuo esille DC-verkon käynnistykseen aikaisen virran käyttäytymistä. Energiavarastot eivät olleet toiminnassa, kun simuloitiin AC-verkon jännitekuoppien ja oikosulkuvikojen vaikutusta DC-jännitteeseen.

Käynnistykseen vaikuttavat etenkin DC-verkon eri liittyneiden kondensaattoreiden koot sekä syöttävän muuntajan ominaisuudet, jotka vaikuttavat järjestelmän aikavälin suuruuteen. Lisäksi käynnistystä voidaan nopeuttaa sallimalla AC/DC-suuntaajalle suuremmat virtarajat, jolloin DC-verkon jännitteen kasvattamiseen tarvittavaa virtaa saataisiin hetkellisesti enemmän käyttöön.

Järjestelmän käynnistykseen nopeus ei käytännössä olisi niin tärkeää, koska todennäköisesti käynnistys jouduttaisiin tekemään ainoastaan muutamia kertoja järjestelmän elinajan aikana lukuun ottamatta huoltokeskeytyksiä. Keski-jännite-DC-verkon simuloinneista voidaan todeta, että mitä suuremmilla tehoilla ja jännitteillä toteutettu järjestelmä on kyseessä, sitä kauemmin sen käynnistäminen kestää. Kuva 9-8 tuo esille sen, että 13,5 kV -järjestelmän käynnistys voisi kestää noin 5 sekuntia.



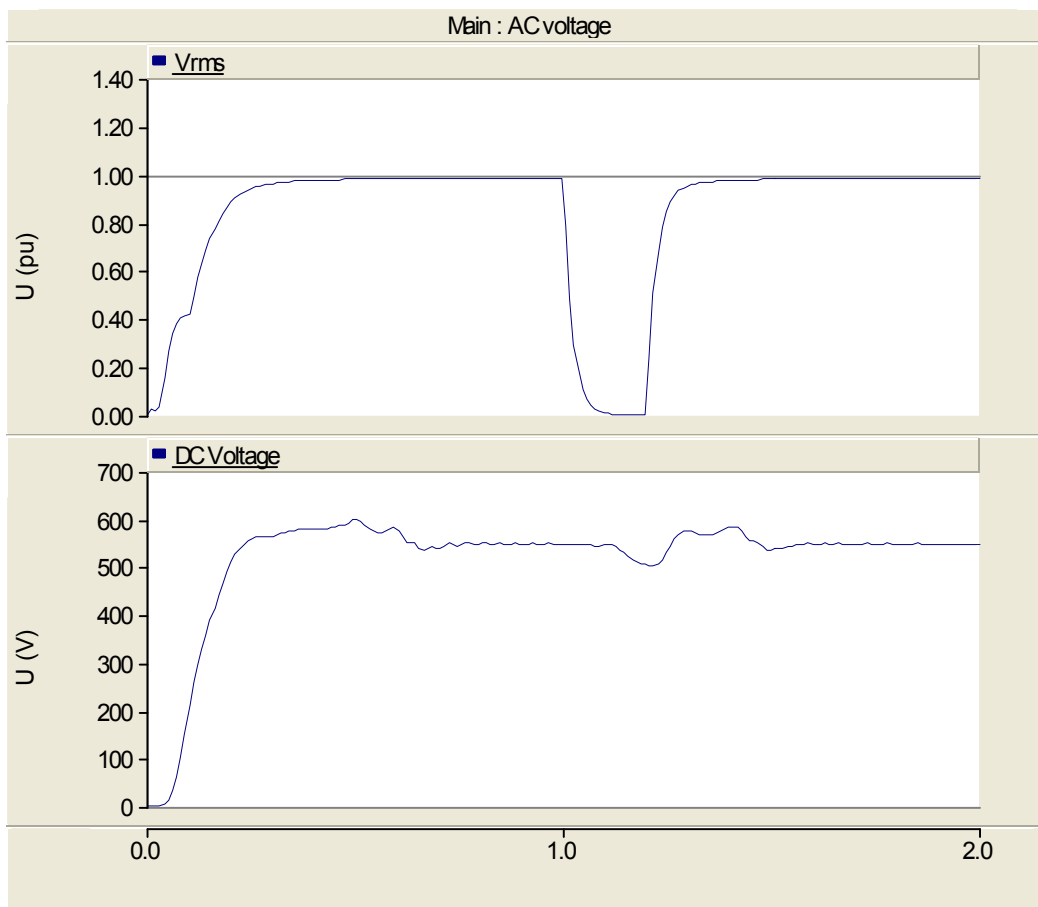
Kuva 9-2. DC-verkon AC-liitynnän syöttävän muuntajan takana tapahtuva 100 %:n jännitekuoppa kestoltaan 50 ms. Kuvassa yllä AC-verkon jännitteen tehollisarvon pu-arvo ja alla DC-jännite.

### **AC-verkon jännitekuoppa**

Koska simulointien tarkoituksena oli tuoda esille DC-verkon potentiaalia sähkön laadun parantamisessa, on erityisesti mielenkiinnon kohteena AC-verkon jännitekuopat. Jännitekuoppia simuloitiin kahdessa eri tapauksessa. Kuva 9-2 tuo esille tilanteen, jossa muuntajan takana AC-verkon puolella ajan hetkellä  $t = 1$  s tapahtuvan 50 ms kestävä 100 %:n jännitekuopan vaikutukset eivät näy DC-verkon jännitteessä lähes ollenkaan. Kuva 9-3 tuo esille vastaavasti esille tilanteen, jossa muuntajan takana AC-verkon puolella tapahtuvan 200 ms kestävä 100 %:n jännitekuopan vaikutukset DC-verkon jännitteeseen ovat noin  $\pm 10$  %. Siitä huolimatta kuormien AC-jännitteeseen sillä ei ole juurikaan vaikutusta, koska DC/AC-suuntaajat ja niiden kondensaattorit vaimentavat DC- ja AC-jännitteiden välistä vaikutusta.

Simulointituloksista voidaan selkeästi nähdä, että kyseisillä DC-verkon parametreilla jännitekuoppien määrää loppukäyttäjillä voitaisiin todennäköisesti vähentää huomattavasti. Erityisesti se, että simuloitava DC-verkko selviytyi 200 ms:n jännitekuopasta ilman energiavarastoa, on merkille pantavaa. 200 ms:n jännitekuoppa on tilanteista toden-

mukaisempi, koska käytännössä jännitekuopan aiheuttanut oikosulku esim. toisessa lähdössä aiheuttaa pikajälleenkytkentöineen pitempikestoisen kuin 50 ms jännitekuopan.



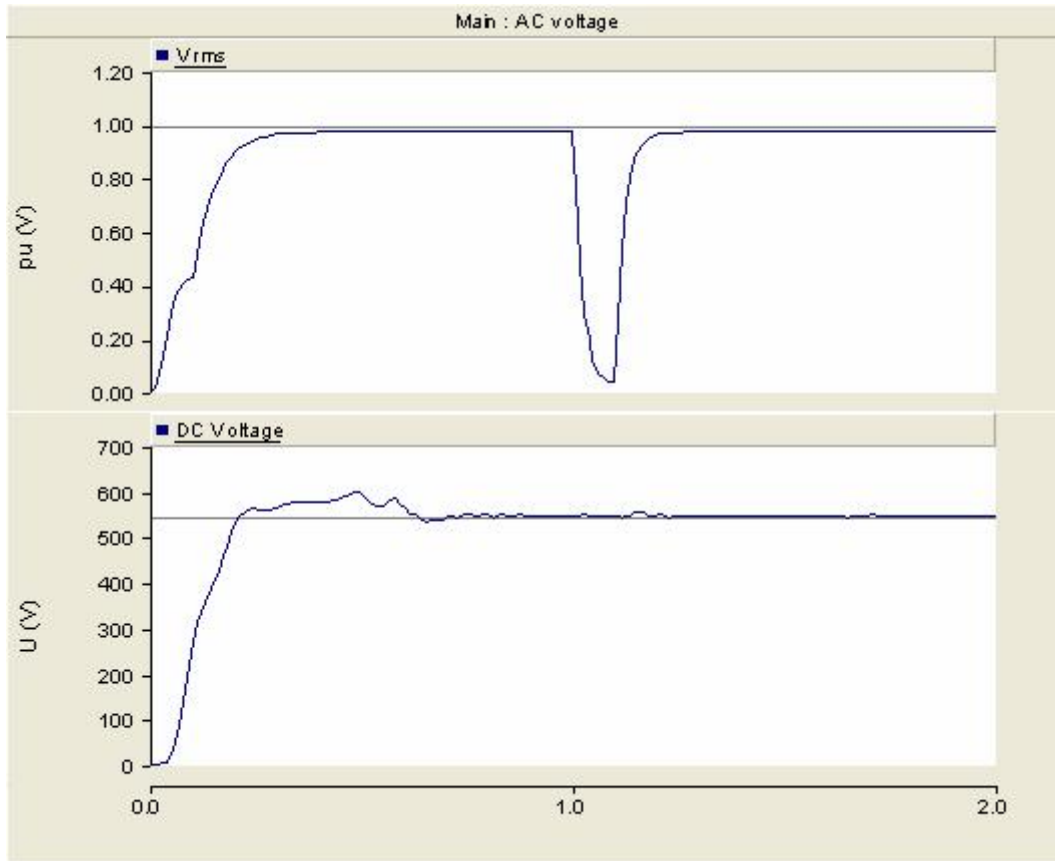
Kuva 9-3. DC-verkon AC-liitynnän syöttävän muuntajan takana tapahtuva 100 %:n jännitekuoppa kestoaltaan 200 ms. Kuvassa yllä AC-verkon jännitteen tehollisarvon pu-arvo ja alla DC-jännite.

### **AC/DC-suuntaajan ja muuntajan välissä tapahtuva oikosulku**

AC-verkon jännitekuopilla ja AC/DC-suuntaajan ja muuntajan välissä tapahtuvilla oikosuluilla ei sinänsä ole paljoakaan eroa DC-verkon kannalta, jos ne eivät vahingoita esimerkiksi suuntaajan komponentteja. Molemmissa syöttöjännite laskee lähelle nollaa tietyksi ajaksi. Kuva 9-4 tuo esille sen, kuinka simuloitava DC-verkko selviää 100 ms:n oikosulkuviasta yhtä hyvin kuin AC-verkossa esiintyvistä jännitekuopista, joka tapahtuu ajan hetkellä  $t = 1$  s.

DC-jännitteessä on nähtävissä ainoastaan hyvin marginaalisia muutoksia. Pienet muutokset eivät välity lainkaan loppukäyttäjien AC-jännitteeseen samoista syistä kuin jännitekuoppien tapauksessa. Voidaan siis todeta, että tämäntyyppisellä DC-verkolla olisi

todennäköisesti mahdollista parantaa loppukäyttäjien sähkön laatua huomattavasti. Vuonna 2003 jopa noin 80 % keskeytyksistä johtui häiriöistä keskijänniteverkossa. Katkosten poistaminen olisi siis erittäin merkittävä parannus loppukäyttäjien sähkön laadulle. [21]



Kuva 9-4. AC/DC-suuntaajan ja sitä syöttävän muuntajan välissä tapahtuva 100 ms:n 3-vaiheinen oikosulku. Kuvassa yllä AC-puolen jännitteen tehollisarvon pu-arvo ja alla DC-jännite.

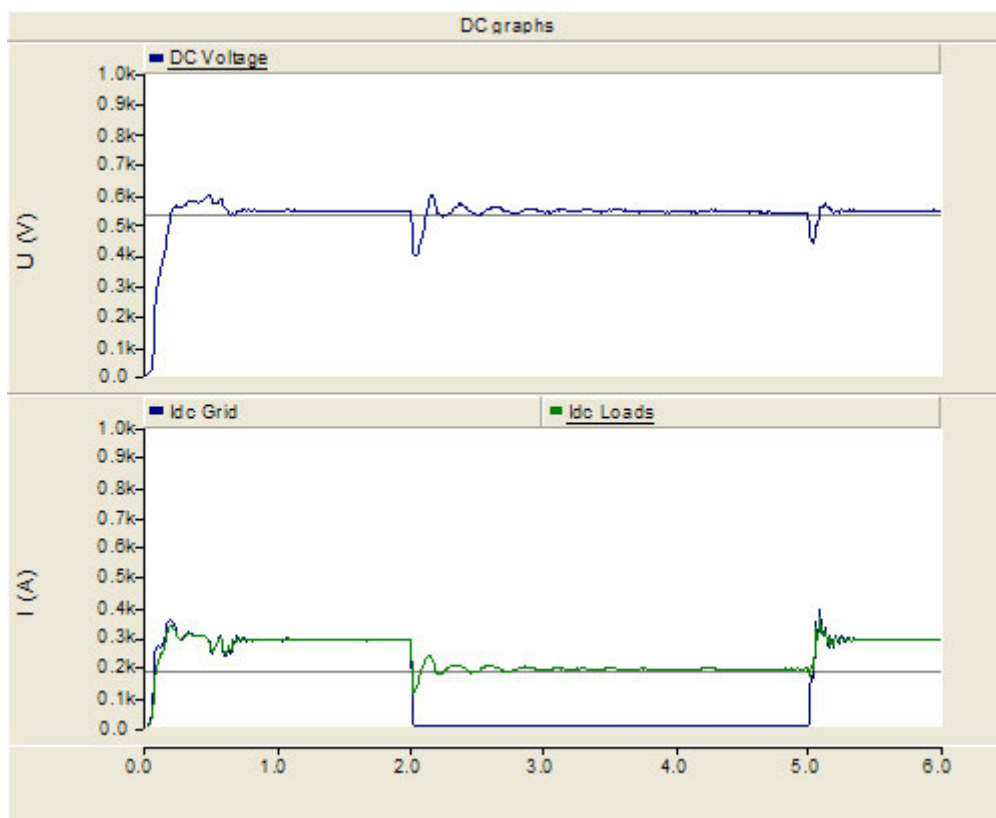
### **DC-verkon siirtyminen mikroverkkoon ja takaisin**

Koska keskijänniteverkoissa esiintyy myös pitkäaikaisempia katkoksia kuin 200 ms, on työssä simuloitu DC-verkon käyttämistä saarekkeena eli mikroverkkona. Tässä työssä pienjännite-DC-verkkoon on ainoastaan kytketty keskitetty energiavarasto ilman pitemmän tehontarpeen tyydyttävää varavoimaa. Lisäksi eräs 50 kW -kuormista eroaa mikroverkkokäytön ajaksi verkosta omaksi yhdenkäyttäjän mikroverkoksi helpottaakseen keskitetyn energiavaraston tehtävää ylläpitää jännitettä.

Kuva 9-5 tuo esille, kuinka verkon DC-jännite käyttäytyy verkon kytkeytyessä energiavaraston varaan. Kuvasta voidaan nähdä, kuinka energiavaraston jäykkyys jännitteen ylläpitäjänä ei ole yhtä hyvä kuin AC-verkon syötöllä. Tämän vuoksi siirryttäessä mik-

roverkkoon DC-jännitteeseen syntyy noin 100 ms:n ja 30 %:n kuoppa. Sen jälkeen jännitteessä esiintyy lievää huojuntaa. Tämä voi johtua energiavaraston DC/DC-katkojen huonosta säädöstä tai koko DC-verkon huonoista dynaamisista ominaisuuksista. Niitä voitaisiin parantaa paremmalla kondensaattoreiden, kaapeleiden ja jännitteen yhteensovittamisella. [1]

Alemmasta kuvaajasta voidaan nähdä, kuinka mikroverkon aikainen nimellisvirta on pois pudonnut kuorman ansiosta kolmannes normaalista. Palattaessa mikroverkosta normaaliin tilaan kuorma kytkeytyy samanaikaisesti takaisin, jolloin AC-verkosta otetaan jälleen alkuperäinen nimellisvirta.

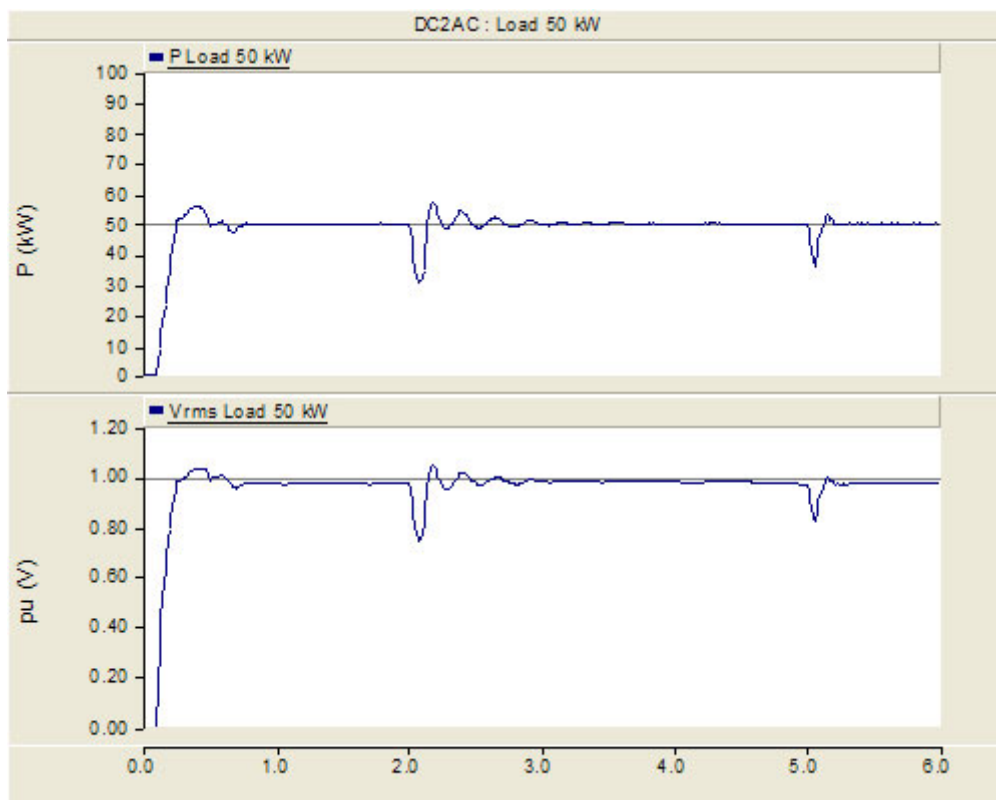


Kuva 9-5. Siirtyminen DC-mikroverkkoon ajan hetkellä 2 s. Mikroverkossa yksi kuormista kytkeytyy oman energiavaraston varaan. Yllä DC-verkon jännite ja alla kuormien ottama virta (vihreä) ja AC-liitynnän syöttämä virta (sininen).

Kuva 9-6 tuo esille 50 kW -kuorman jännitteen ja pätötehon käyttäytymisen, kun järjestelmä siirtyy hetkellisesti mikroverkkotilaan. Kuvaajista huomataan heti, kuinka kuorman AC-puolen jännitteessä näkyy lähes yhtä suuret kytkennästä johtuvat häiriöt kuin DC-jännitteessä. AC-jännitteen heilahtelu kuitenkin vakiintuu hieman nopeammin. Koska kaikilla suuntaajilla on tässä simuloinnissa samoin tavoin toteutettu yksinkertainen PI-säätö, syntyy kytkennästä liian suuret jännitekuopat. Kuoppien syntyä voitaisiin

ehkäistä kehittämällä parempi säätöalgoritmi, sekä myös erilaisten kytkentätopologioiden kokeilu voisi olla ratkaisu. Esimerkiksi porrastamalla kuormien kytkemistä voitaisiin kytkennästä saada pehmeämpi.

Alemmasta kuvaajasta voidaan nähdä, kuinka yksittäisen käyttäjän energiavaraston varaus alkaa vähentyä, ja sen antama virta ei enää täysin riitä jännitteen ylläpitämiseen. Tästä syystä ei olisi mielekästä suunnitella DC-mikroverkkoa ainoastaan energiavaraston varaan, vaan verkon redundanttisuuden kannalta siinä tulisi olla myös hajautettua tuotantoa.

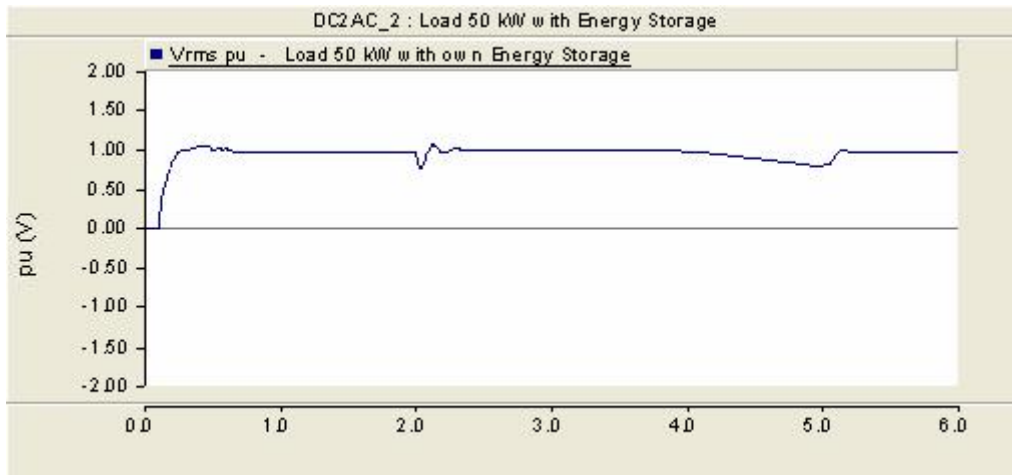


Kuva 9-6. Yhden 50 kW -kuorman ottama teho ja jännitteen pu-arvo AC-puolella DC-verkon käydessä mikroverkkotilassa aikavälillä 2–5 s.

Kuva 9-7 kuvaa DC-verkosta mikroverkkotilan ajaksi eroavan kuorman jännitettä. Huomataan selkeä ero dynaamisissa ominaisuuksissa. Jännitteessä ei esiinny samanlaista huojuntaa kuin muilla kuormilla. Muita kuormia syötetään 100 m kaapelin kautta, kun taas tällä kyseisellä kuormalla energiavarasto sijaitsee suoraan sen DC/AC-suuntaajan navoissa. Noin 4 s:n kohdalla yksittäisen käyttäjän energiavaraston varaus alkaa olla lopussa, ja jännite alkaa laskea. Käytännössä voitaisiin määrätä sen takaisinkytketymisen DC-verkkoon myös mikroverkkotilan aikana, mikäli sen omat resurssit eivät riittäisi vaadittua aikaa. Yksittäinen energiavarasto olisi täten säästännyt keskitetyn energiavaraston varausta sen takaisinkytketymiseen asti.



## Yksittäisen käyttäjän DC-mikroverkko



Kuva 9-7. DC-verkosta eroavan 50 kW -kuorman AC-jännitteen pu-arvo omalla energiavarastolla ylläpidettynä.

### **9.3.2 Case 2 – Energiavarastoilla ja varavoimalla varmennettu keskijänniteasiakkaiden DC-verkko**

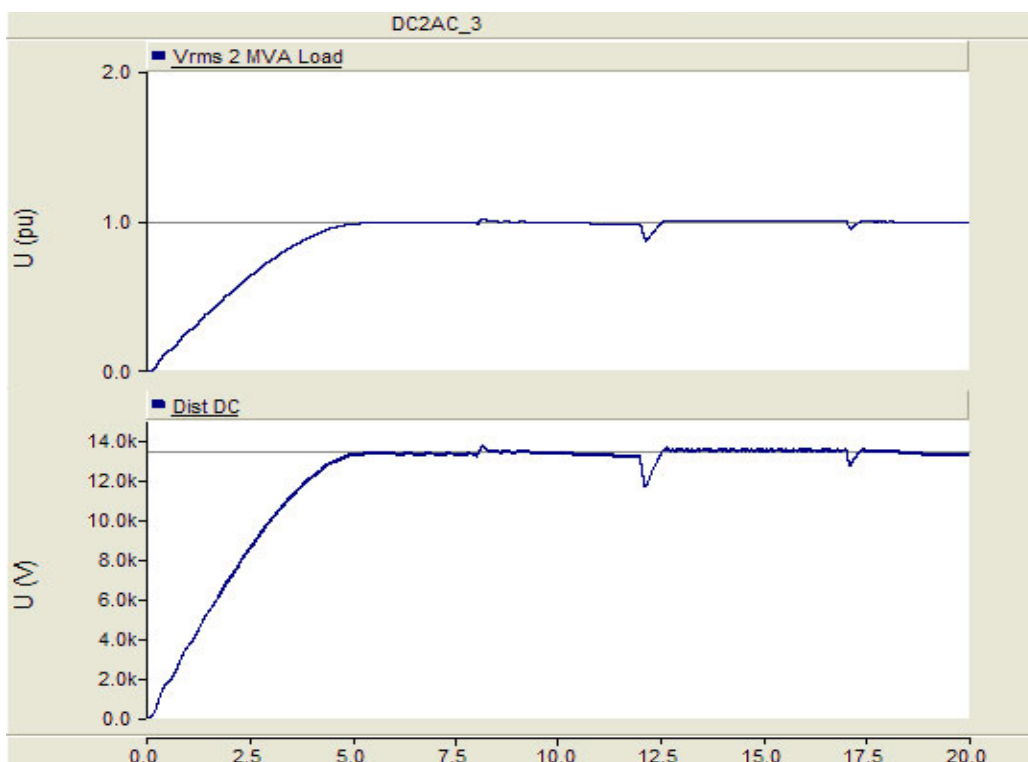
Keskijänniteasiakkaiden DC-verkolle suoritettiin ainoastaan simulointi, jossa DC-verkko siirtyy AC-verkon syötön varasta varavoiman varaan. Tämä tapahtuu keskitetyn energiavaraston avustuksella, jolloin varavoimageneraattorilla on riittävästi aikaa käynnistyä.

AC-verkon syöttö vikautuu ajan hetkellä  $t = 8$  s, jolloin DC-verkko siirtyy keskitetyn energiavaraston varaan 4 sekunnin ajaksi. Keskitetty energiavarasto syöttää kuormia 100 m:n kaapelin kautta. Ajan hetkellä  $t = 12$  s kytkeytyvät kuormat irti 100 m:n kaapelista, johon energiavarasto ja AC-verkon syöttö on kytketty. Samaan aikaan kuormien navoissa sijaitseva varavoimageneraattori kytketään verkkoon oman AC/DC-suuntaajan kautta. DC-verkko palaa mikroverkkotilasta normaaliin tilaan ajan hetkellä  $t = 17$  s. Varavoimalla voitaisiin luonnollisesti toimia mikroverkkotilassa useita tunteja, mikäli se olisi tarpeellista. Tästä syystä energiavarastolla ja varavoimalla varmennettu DC-verkko olisi erittäin hyvä ratkaisu kohteille, joissa on tarvetta katkeamattomalle sähkönsyötölle.

Kuva 9-8 tuo esille yhden 2 MVA:n kuorman AC-jännitteen käyttäytymistä siirryttäessä mikroverkkotilaan. Lisäksi alemmassa kuvaajassa on esitetty kuormien navoissa vallitseva DC-jännite. AC-verkon syötön kytkeytyessä pois verkosta alkaa energiavarasto syöttää tehoa verkkoon. Kytkennoistä ja energiavaraston antamasta virtapiikistä johtuen DC-jännite nousee hieman yli nimellisen, mutta palautuu nopeasti. Saavuttaessa ajan hetkeen  $t = 12$  s varavoima kytkeytyy verkkoon. DC-jännitteeseen syntyy noin 10 %:n

syvyinen kuoppa, joka on kestoltaan 400–500 ms. Tämän jälkeen DC-jännitteessä ei kuitenkaan esiinny heilahtelua, vaan se palaa suoraan nimellisarvoonsa. DC-jännitteen kuoppa näkyy myös vastaavanlaisena kuorman AC-jännitteessä. Kuorman jännitekuopan syvyys on kuitenkin mitätön, jos oletetaan, että ilman varmennettua DC-mikroverkkoa katkos olisi totaalinen.

Varavoimageneraattori lähteenä ei ole luonnollisesti yhtä jäykkä kuin AC-verkko. Siksi DC-jännitteessä on havaittavissa lieviä häiriöitä mikroverkkotilan aikana. Häiriöt kuitenkin suodattuvat pois kuormien DC/AC-suuntaajissa eivätkä välity niiden AC-jännitteeseen. Saavuttaessa ajan hetkeen  $t = 17$  s kytkeytyy varavoima irti verkosta. AC-verkon syöttö alkaa toimia DC-verkossa jälleen primääritehonlähteenä. Kuva 9-8 tuo esille, kuinka jälkimmäinen jännitekuoppa on selkeästi ensimmäistä pienempi. Tämä johtuu siitä, että kytkettäessä kuormat irti DC-verkosta kaapelin päästä, jää kaapeli jännitteiseksi, koska AC-verkon syöttö ja energiavarasto kytketään myös irti kaapelista samanaikaisesti. Koska maadoitusta ei ole, kaapelissa olevalla varauksella ei ole mahdollisuutta purkautua täysin. Käytännössä kuitenkin tällaisen ilmiön varaan ei tulisi suunnitella verkon toiminnallisuuksia.

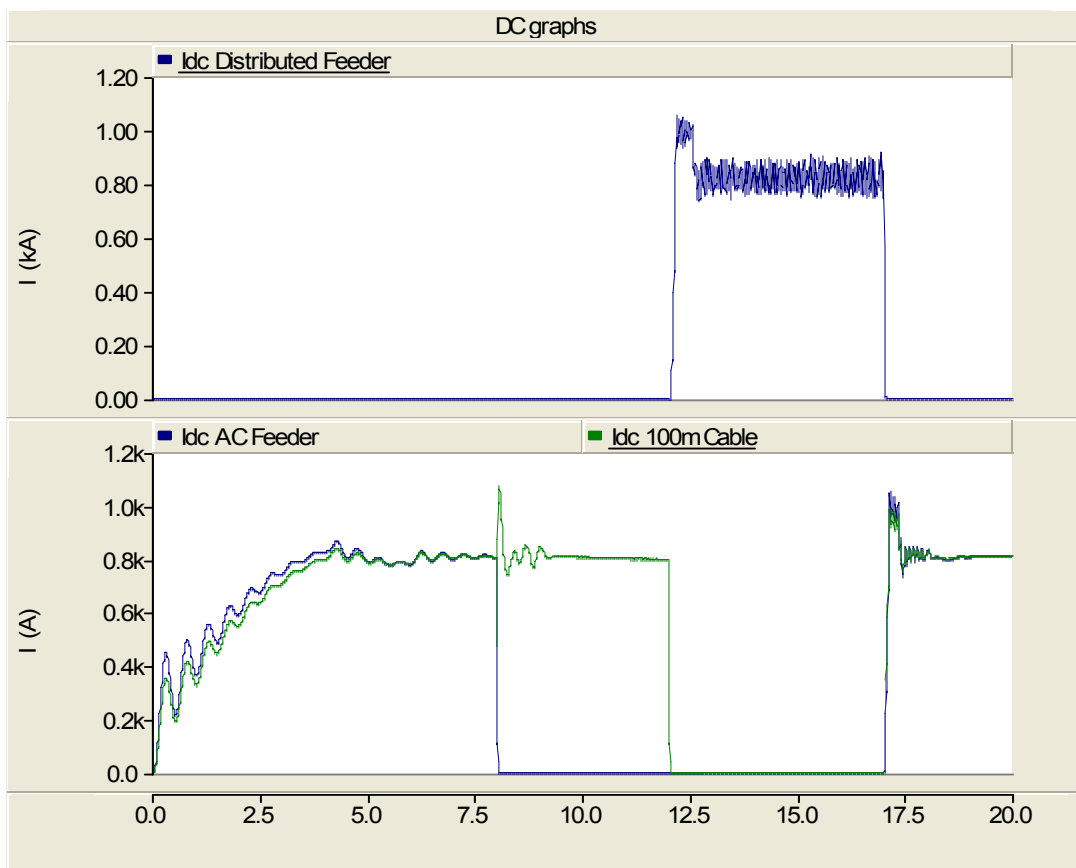


Kuva 9-8. Ylemmässä kuvaajassa on esitetty yhden 2 MVA:n kuorman AC-jännitteen pu-arvo. Alemmassa on DC-verkon jännite kuormien navoissa mikroverkkotilan aikana.

Kuva 9-9 tuo esille keskijänniteasiakkaille tarkoitetun DC-verkon virtojen käyttäytymistä. Alemmassa kuvaajassa on esitetty AC-verkon syötön ja energiavaraston virtojen käyrät.

Kytettäessä energiavarasto verkkoon se antaa tässä tapauksessa 1 kA:n suuruisen virtapiikin. Energiavaraston syöttämässä virrassa on huomattavissa lievää huojuntaa, joka voi johtua jo aiemminkin mainitusta yksinkertaisesta säätöpiiristä.

Ylemmässä kuvaajassa on esitetty varavoimageneraattorin syöttämä virta, jossa on värähtelyä. Varavoimageneraattori syöttää maksimivirtansa aluksi nostaakseen jännitteen takaisin nimelliseen sen hieman pudottua DC-verkon kytkentämuutosten aikana. Tämän jälkeen virran keskiarvona on kuormien ottama 840 A:n nimellisvirta. Virrassa esiintyvä värähtely voi esimerkiksi johtua generaattorin jännitesäätäjän epästabiilista toiminnasta. Palaaminen normaaliin tilaan tapahtuu ajan hetkellä  $t = 17$  s, jolloin AC/DC-suuntaaja syöttää maksimivirran noin 500 ms ajan nostaakseen kytkennöistä pudonneen DC-jännitteen takaisin nimelliseen. Jännitteen tasaannuttua virtaheilahtelut tasaantuvat noin 2 sekunnin kuluessa.



Kuva 9-9. Ylemmässä kuvaajassa on esitetty varavoiman syöttämä DC-virta mikroverkotilan aikana. Alemmassa on esitetty AC-verkon syötön (sininen) ja energiavaraston (vihreä aika välillä  $t = 8-12$  s) virrat.

## 9.4 Simuloinnin yhteenveto

Simuloinnin tuloksista voidaan selkeästi nähdä, että varmennetulla DC-verkolla on mahdollista välttää sähkökatkoksien välittyminen loppukäyttäjille. Simuloinneissa käytetyn DC-verkon vastaavuutta todellisuuteen ei voida kuitenkaan taata. Esimerkiksi käyrien muodot ja kytkentätilanteissa esiintyvien jännitekuoppien suuruudet ovat vain suuntaa antavia. Siitä huolimatta simulointipiirin vastaavuus todellisuuteen on varmasti niin hyvä, että simuloinnit antavat näyttöä siitä, kuinka varmennettu DC-jakeluverkko esimerkiksi voitaisiin toteuttaa.

Jotta järjestelmän virtojen käyttäytyminen saataisiin pehmeäksi ja ylimääräiset häiriöt poistettua, tulisi DC-verkon dynaamisten ominaisuuksien suunnitteluun kiinnittää erityistä huomiota. Tässä simuloinnissa liityntälaitteiden ohjauksena käytettiin yksinkertaista PI-säädintä, jonka referenssiarvona oli DC-jännite. Ohjaus vastaa karkeasti ottaen jo aiemmin luvussa 6.4 esiteltyä Voltage Droop -ohjausmetodia, joka todennäköisesti olisi järkevin ratkaisu vapaille sähkömarkkinoille. DC-jakeluverkkoon liittyvien laitteiden ohjauksen suunnittelu vaatisi kuitenkin vielä paljon lisää tutkimusta, jotta laitteiden liittämistä verkkoon saataisiin yksinkertaista, mutta samaan aikaan keskitetysti kontrolloitua.

Simuloitujen tapausten lisäksi tulisi tutkia DC-verkon oikosulkuja ja niiden vaikutusta sen stabiilisuuteen. Myös erilaisten maadoituskäytäntöjen soveltuvuuden tutkimista eri toimintaympäristöihin sekä DC-verkon suojauskomponenttien kehittämistä ei voida unohtaa.

Case-tapauksissa esitetyt DC-jännitetasot on valittu siten, että järjestelmä saataisiin toteutettua mahdollisimman vähin kustannuksin, esimerkiksi välttämällä ylimääräisten muuntajien hankinta. Tästä kuitenkin aiheutuu se, että esimerkiksi pienjännitejakeluverkon siirtokapasiteettia ei voida täysin hyödyntää 540 V DC -jännitteellä. Toisaalta se olisi kustannustehokas ratkaisu, koska voitaisiin hyödyntää UPS-laitteista tuttuja komponentteja.

## 10. Kustannustarkastelut

### 10.1 Vaihtojänniteverkon kustannustekijät

Vaihtojänniteverkon tärkeimpinä kustannustekijöinä voidaan pitää investointikustannuksia sekä häviö- ja keskeytyskustannuksia. Investointikustannuksien suurimpina yksittäisinä osatekijöinä ovat muuntajat verkkoonkytkentälaitteineen ja kaapelointikustannukset.

#### 10.1.1 Muuntajien kustannukset

Tässä työssä muuntajien kustannuksiksi huomioidaan ainoastaan varsinaisen muuntajan kustannukset sekä muuntamoiden aiheuttamat kustannukset. Kustannusvertailussa ei oteta huomioon muuntajiin tai muuntamoihin liittyviä mahdollisia ylläpitokustannuksia. Etenkin esimerkiksi kuivamuuntajilla huoltokustannusten merkitys on suhteellisen vähäinen. Kustannusvertailun muuntajien komponenttien hinnat perustuvat energiamarkkinaviraston laatimiin komponenttien keskihintoihin. Vertailussa käytetään vuodelle 2007 indeksikorjattuja komponenttien yksikköhintoja. Taulukko 10-1 tuo esille erikoisten muuntajien yksikköhinnat vuodelle 2007. Vertailussa muuntajan ja muuntamoiden kustannuksiin oletetaan sisältyvän kaikki muuntajan verkkoon kytkemiseen tarvittava laitteistot, kuten katkaisijat, releistys ja kentät. Seuraavissa taulukoissa (Taulukko 10-1 ja Taulukko 10-2) on esitetty eri muuntamotyyppien yksikköhintoja. [65]

*Taulukko 10-1. Jakelumuuntajien indeksikorjatut yksikköhinnat vuodelle 2007. [65]*

Jakelumuuntajat	Yksikkö	Indeksikorjattu yksikköhinta [€]
16 kVA	kpl	2 610
30 kVA	kpl	2 610
50 kVA	kpl	2 980
100–160 kVA	kpl	3 780
200 kVA	kpl	4 600
300–315 kVA	kpl	6 070
500–630 kVA	kpl	8 200
800 kVA	kpl	9 760
1 000 kVA	kpl	12 180
1 250 kVA	kpl	15 920
1 600 kVA	kpl	19 570

Taulukko 10-2. Muuntamoiden indeksikorjatut yksikköhinnat vuodelle 2007. [65]

Muuntamot	Yksikkö	Indeksikorjattu yksikköhinta [€]
1-pylväsmuuntamo	kpl	3 800
2-pylväsmuuntamo	kpl	6 580
4-pylväsmuuntamo	kpl	9 340
Puistomuuntamo, tyyppi 1	kpl	30 430
Puistomuuntamo, tyyppi 2	kpl	36 460
Kiinteistömuuntamo	kpl	39 370
Satelliittimuuntamo (enint. 315 kVA)	kpl	17 750
Satelliittimuuntamo (väh. 400 kVA)	kpl	17 630

### 10.1.2 Kaapeleiden kustannukset

Tässä työssä vertaillaan vaihto- ja tasajänniteverkkojen elinkaarikustannuksia taajaman sähköjälkijakelussa. Tästä syystä huomion kohteena ovat ainoastaan maakaapeleiden kustannukset ja sovellusmahdollisuudet tasajänniteverkoissa. Kustannusvertailun kaapeleiden komponenttien hinnat perustuvat energiamarkkinaviraston laatimiin komponenttien keskihintoihin. Vertailussa käytetään vuodelle 2007 indeksikorjattuja komponenttien yksikköhintoja. Jakeluverkoissa maakaapeleiden kustannukset koostuvat materiaali-, asennus- ja kaivuukustannuksista. Taulukko 10-3 tuo esille maakaapeleiden materiaali- ja asennuskustannukset yhteen laskettuna. Taulukko 10-4 taas kuvaa maakaapeleiden asentamiseen liittyvien kaivuukustannuksien suuruutta eri asutusalueilla.

Taulukko 10-3. 20 kV:n maakaapelien materiaali- ja asennuskustannukset. [65]

20 kV:n maakaapelit (materiaali+asennus)	Yksikkö	Indeksikorjattu yksikköhinta [€]
enintään 70 mm <sup>2</sup> maakaapeli	km	33 160
95–120 mm <sup>2</sup> maakaapeli	km	36 740
150–185 mm <sup>2</sup> maakaapeli	km	43 860
240–300 mm <sup>2</sup> maakaapeli	km	46 310
enintään 70 mm <sup>2</sup> vesistökaapeli	km	57 320
95–120 mm <sup>2</sup> vesistökaapeli	km	48 360
Kojeistopääte	kpl	1 130
Pylväspääte	kpl	2 520
Jatko	kpl	1 900

Taulukko 10-4. 20 kV:n maakaapeliin kaivukustannukset eri asutusalueilla. [65]

20 kV:n maakaapelit (kaivu)	Yksikkö	Indeksikorjattu yksikköhinta [€]
Haja-asutusalue	km	11 660
Taajama-alue	km	33 350
Kaupunkialue	km	62 430

Vertailussa maaperä oletetaan homogeeniseksi, jolloin maanajosta ei aiheudu lisäkustannuksia. Lisäksi mahdolliset muun infrastruktuurin aiheuttamat lisäkustannukset siivutetaan. Jakeluverkkojen komponenttien hintojen keskiarvot voidaan olettaa melko tarkkoiksi, koska hintojen raju heilahtelu ei ole alalle tyypillistä.

### 10.1.3 Häviökustannukset

Häviöt muodostuvat pääasiassa muuntajissa ja siirtojohdoissa. Muuntajien osuus häviöistä on yleensä noin yksi kolmannes. Verkostohäviöiden muodostuminen siirtojohdoissa voidaan määrittää, kun tunnetaan siirtojohtojen impedanssi johdinyksikköä kohden. Verkostohäviöt ovat neliöllisesti riippuvaisia verkon kuormituksesta ja suoraan verrannollisia johtimien impedanssiin kaavan (30) mukaisesti.

$$P_h = 3 \cdot I_v^2 \cdot R \quad (30)$$

$I_v$  on kolmivaihejohtimen vaihevirta

$R$  on vaihejohtimen resistanssi

$P_h$  on johtimen kuormitushäviöt.

Loistehohäviöiden merkitys jakeluverkoissa on melko vähäinen tehokertoimen ollessa kohtuullinen. Siksi riittää, että häviöiden laskentaan käytetään ainoastaan siirtojohtojen resistanssia. Jotta häviökustannuksia voitaisiin määrittää, joudutaan laskemaan kuormitushäviöiden aiheuttamat energiahäviöt. Siirtojohtojen energiahäviöt saadaan kertomalla kuormitushäviöt niiden käyttöajalla. Tämä on kuitenkin approksimoiva tapa laskea, koska todelliset energiahäviöt saadaan kuormitushäviöiden aikaintegraalina eli jokaisella hetkellä kulutetun energian summana. Energiahäviöt voidaan laskea kaavan (31) mukaisesti.

$$W_h = \int_0^T P_h(t) dt \approx P_{h,max} \cdot t_h \quad (31)$$

$P_h(t)$  on johtimen kuormitushäviöt ajan hetkellä  $t$   
 $P_{h,max}$  on johtimen kuormitushäviöiden huippuarvo  
 $t_h$  on häviöiden käyttöaika  
 $W_h$  on energiahäviöt ajan jaksolla  $0 \rightarrow T$ .

### Muuntajan kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt

Muuntajan kuormitushäviöt riippuvat muuntajan kuormituksesta kaavan (32) mukaan. Kuormitushäviöt kasvavat neliöllisesti muuntajan kuormituksen kasvaessa. Muuntajan nimelliskuormitushäviö riippuu muuntajatyypistä ja muuntajan nimellistehosta.

$$P_{kh} = \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{kN} \quad (32)$$

$S$  on muuntajan kuorma  
 $S_n$  on muuntajan nimellisteho  
 $P_{kN}$  on nimelliskuormitushäviö  
 $P_{kh}$  on muuntajan kuormitushäviö kuormalla  $S$ .

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ovat lähes riippumattomat muuntajan kuormituksesta. Tyhjäkäyntihäviöt kuvaavat muuntajan rautasydämessä vaihtelevan magneettivuon aiheuttamia hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä. Tyhjäkäyntihäviöiden suuruus ilmoitetaan muuntajan kilpiarvoissa nimellisjännitteellä. Muuntajan nimellisjännitteen ja tyhjäkäyntihäviöiden yhteyttä mallinnetaan yhtälöllä  $P_0 \propto U^k$ ,  $k \in \{2-4\}$ . Muuntajan tyhjäkäyntihäviöistä johtuvien energiahäviöiden laskemiseen voidaan käyttää myös kaavaa (31), jolloin kuormitushäviöiden  $P_{kh}(t)$  sijasta käytetään kyseisen muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä  $P_0(t)$ . [3]

#### 10.1.4 Keskeytyskustannukset

Koska tässä työssä tutkittavan taajaman jakeluverkon oletetaan olevan maakaapeliverkkoa, ei KAH-arvoista laskettavien keskeytyskustannusten huomioon ottaminen lopputuloksen kannalta ole oleellista. Maakaapeliverkossa tapahtuvat keskeytykset ovat tyypillisesti hyvin pitkiä verrattaessa avojohtoverkkoon. Koska molempien verkkojen oletetaan olevan maakaapeliverkkoa, on molemmilla vertailuvaihtoehdoilla identtiset keskeytystilastot. Tästä syystä keskeytyskustannukset eivät vaikuta kustannusvertailun lopputulokseen.

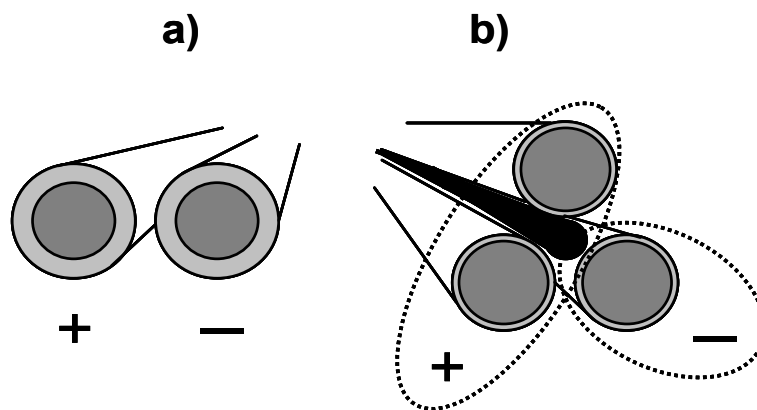


## 10.2 Tasajänniteverkon kustannustekijät

### 10.2.1 Kaapelien kustannukset

Aikaisempien tarkastelujen lähtökohtana on ollut AC-jakeluverkko ja sen muuttaminen tasajänniteverkoksi, jolloin joitakin 20 kV:n vaihtojännitelähtöjä voitaisiin korvata esimerkiksi 1 kV -tasajännitelähdöillä. Tällöin voitaisiin käyttää keskijännitekaapeleiden sijasta pienjännitekaapeleita ja kustannushyöty olisi ilmeinen [1]. Tässä työssä vertaillaan suurempitehoista järjestelmää, jossa pienjännitteen käyttö ei ole mahdollista.

Pienjännitekaapeleiden nollajohtimen koko vaihejohtimiin nähden on tyypillisesti samaa luokkaa tai suurempi, joten nollajohdinkin voidaan hyödyntää tasajännitejärjestelmään siirryttäessä. Keskijännitekaapeleilla tilanne on taas päinvastainen eikä nollajohdinta voida käyttää vaihejohtimien tavoin liian pienen poikkipintansa vuoksi, joten nelijohtimisten keskijännitekaapeleiden kapasiteettia ei voida täysin hyödyntää tasajännitteellä. Kuva 10-1 kuvaa kahta keskijännitteellä käytettävälle tasajännitejärjestelmälle soveltuvaa johdintopologiaa.



Kuva 10-1. Keskijännitekaapeleiden mahdolliset johtotopologiat tasajännitejärjestelmässä. Vaihtoehto a) erilliset varsinaiset DC-kaapelit keskijännitteelle tai vaihtoehto b) vanhojen AC-kaapeleiden hyödyntäminen – kaksi vaihetta rinnankytkettynä muodostaa yhden navan ja kolmas vaihe toisen navan.

Tässä kustannustarkastelussa käytetään AHXAMK-tyypisiä kaapeleita vaihtojännitteellä, joissa vaihejohtimet ovat alumiinia ja nollajohdin kuparia. Tasajännitteellä käytetään AHXCMK-WTC- ja HXCMK-WTC-tyypisiä kaapeleita, jotka ovat yksijohdinkaapeleita ja joissa vaihejohdin on alumiinia. Kaapeleita Suomessa toimittaa ainakin Prysmian Cables & Systems (ent. Pirelli Cables). [66]

Taulukko 10-5. Tasajänniteverkon komponenttien hinnat.

DC-verkon komponentit	Yksikkö	Hinta
Pääsuuntaaja 4 MVA	€	400 000
Jakelusuuntaajat 8 x 0,5 MVA	€	400 000
Kaapeli AHXCMK-WTC 1 x 240 Al / 35 Cu	€/km	9 000
Kaapeli HXCMK 35 Al / 1 6Cu	€/km	8 500

DC-verkon komponenttien hinnat voivat vaihdella suuresti riippuen niiden ominaisuuksista ja teholuokista. Yksijohdinkaapeleiden hinnat ovat valmistajilta saatuja arvoja. [69]

### 10.2.2 Suuntaajien kustannukset

Jakeluverkkosovelluksiin tulisi soveltaa IGBT-moduuleilla varustettuja suuntaajia, jotta tehon virtaus olisi tarvittaessa mahdollista molempiin suuntiin. Keskijännitteelle suunniteltujen IGBT-moduulien hinnat ovat melko korkeat, jos verrataan mahdollisten suuntaajien kustannuksia nykyisiin jakelumuuntajiin. Siirryttäessä suurempiin jännitteisiin joudutaan moduuleita kytkemään sarjaan jännitekestoisuuden nostamiseksi.

Suuntaajien kustannukset on tässä tarkastelussa arvioitu jokseenkin korkeiksi (100 €/kW). Kustannusvertailussa on käytetty samaa hintaa sekä päätasasuuntaajalle että vaihtojakelusuuntaajille. Vaihtosuuntaajien kustannus todennäköisesti olisi hieman alhaisempi, koska niiltä vaadittaisiin huomattavasti vähemmän ominaisuuksia kuin pääsuuntaajalta, joka säätää ja ylläpitää verkon jännitettä.

### 10.2.3 Häviökustannukset

$$P_{cond,DC} = (R_{johdin1} + R_{johdin2}) \cdot I_{dc} \quad (33)$$

$R_{johdin2}$  on toisen johtimen resistanssi

$R_{johdin1}$  on toisen johtimen resistanssi

$P_{cond,DC}$  on tasajännitejohdon häviöteho

$I_{DC}$  on kuormitusvirta.

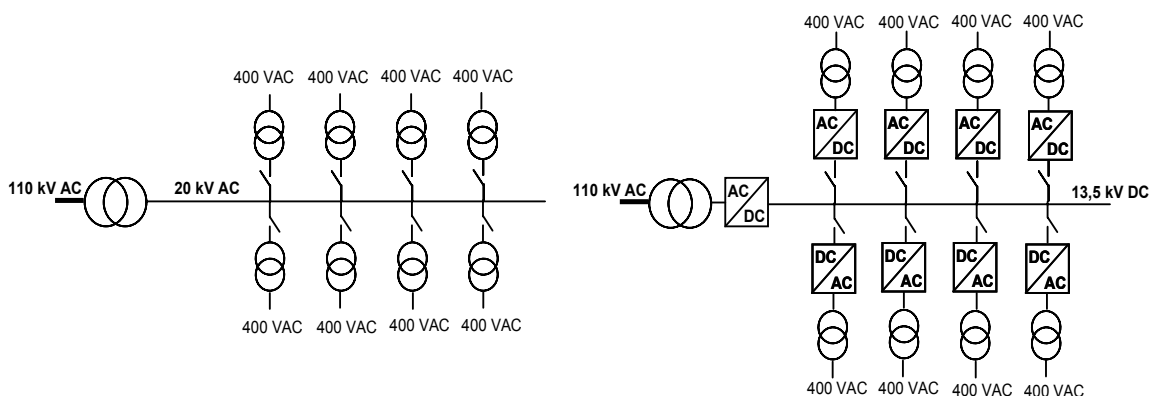
Tasajänniteverkon energiahäviöt kaapeleissa on laskettu kaavalla (32). Kaavassa on eritelty molempien vaihejohtimien resistanssit, koska hyödynnettäessä kolmivaihekaapeleita toisen vaiheen resistanssi on puolet pienempi kahden vaihejohtimen rinnankytkennän takia.

## 10.3 AC- ja DC-keskijännitejakeluverkkojen kustannusvertailu

### 10.3.1 Johdanto

Kustannusvertailun tavoitteena on selvittää AC- ja DC-jakeluverkkojen suhdetta toisiinsa. Aiemmissa tutkimuksissa [1] verrattaessa perinteisen vaihtovirtajärjestelmän 20/0,4 kV -verkon rakentamisen kokonaiskustannuksia 750 V:n tasajännitejärjestelmän kustannuksiin on havaittu tasajännitejärjestelmän kustannusten olevan selkeästi pienemmät (unipolaarijärjestelmässä 37 % ja bipolaarijärjestelmässä 48 %) perinteiseen vaihtovirtajakelujärjestelmään nähden. Näissä kustannuslaskelmissa ei ole huomioitu tehoelektronikan uusimiskustannuksia, mutta tuloksena saatu kustannusero mahdollistaa suuntaajien uusimisen 4–5 kertaa.

DC-jakeluverkon edullisuutta on perusteltu muuntajatarpeen vähentymisellä ja mahdollisuudella korvata keskijännitejohtoja pienjännitejohdoilla. Kuitenkin vertailtaessa keskijänniteverkkoa ei muuntajatarve välttämättä vähene vaan kasvaa. Tähän on syynä se, että verrattaessa 110/20 kV -sähköaseman AC- ja DC-jakelua voidaan havaita, että vaihtojännitteellä tarvitaan vain jakelumuuntajat 0,4 kVAC -jännitteeseen pääsemiseksi, mutta tasajänniteverkolla tarvitaan DC/AC-suuntaajat ja muuntajat. Vaihtoehtoisena ratkaisuna voisi olla, että ennen kuormien navoissa tapahtuvaa vaihtosuuntausta jännite laskettaisiin DC/DC-katkojalla sopivaksi, jolloin vaihtosuuntaajalla saataisiin yhtälön (4) mukaisesti sopiva jännite kuormille. Jännitteen laskeminen DC/DC-katkojalla esimerkiksi 13,5 kV → 0,54 kV ei ole teknistaloudellinen ratkaisu. Tästä syystä perinteisiä jakelumuuntajia tarvittaisiin, jotta 0,4 kV -jännitteen syöttäminen pienjännitekuormille olisi mahdollista. Muuntajien korvaaminen olisi myös mahdollista erillisten tehoelektronisten muuntajien avulla.



Kuva 10-2. Keskijännitteellä toteutetun vaihto- ja tasajännitejakeluverkon erot muuntajien ja suuntaajien sijoittelussa. Kuvasta nähdään, kuinka muuntajista ei välttämättä keskijänniteverkossa päästä eroon pienjänniteverkon tapaan.

Keskijännitteellä tehojen ollessa riittävän suurina etenkin taajamissa on keskijännitejohdosten korvaaminen pienjännitejohdoilla mahdotonta. Pienjännitedirektiivi 73/23/EEC määrittelee maksimissaan 1 500 V pienjännitteeksi. Se ei kuitenkaan suurilla tehoilla riitä, joten kaapelikustannuksissa ei saada merkittäviä säästöjä.

Seuraavaan kustannustarkasteluun on tässä työssä valittu DC-jakeluverkon keskijänniteosuus, sillä se on todennäköisesti ensimmäiseksi toteutettavissa osuus taajama-alueen DC-jakelua ja toisaalta kyseessä on yksinkertainen osa jakeluverkkoa, jolloin kustannusvertailu on lähtökohtaisesti mahdollisimman neutraali kummallekin jakeluverkko-tyypille. Kustannuslaskelmissa ei ole huomioitu katkaisijoiden eikä suojalaitteiden kustannuksia, sillä niiden oletetaan vastaavan vaihtovirtajärjestelmän vastaavien laitteiden kustannuksia.

### **10.3.2 Vertailtavien järjestelmien kuvaus**

Kustannusvertailun kohteena on yhteensä kuusi erilaista konfiguraatiota. Kaksi näistä on tasajännitejakeluverkkoja. Tasajännitteelle on laskettu elinkaarikustannukset vanhojen kolmivaihekaapeleiden hyödyntämiselle sekä kokonaan uusien tasajännitekaapeleiden käyttöönotolle. Kohdassa 4.5 tuotiin esille näiden kahden järjestelmän periaatteelliset erot.

Vaihtojännitejakeluverkolle on laskettu neljä erilaista konfiguraatiota. Ne erottaa toisistaan muuntajakoko ja valitut kaapelien paksuudet. Muuntajakoon mukaan on määritetty kuormituksen jakautuminen pitkin johtoa. Kuormituksen oletetaan jakautuvan tasaisesti siten, että 4 km kaapelin puolella välissä on lähden kuormasta jäljellä puolet loppupään kaapelille. Näin saatiin aikaiseksi tasa-arvoinen vertailu eri konfiguraatioiden välillä.

Työssä on oletettu kuormitustiheyden olevan 0,5 MVA/km tehokertoimen ollessa 0,95. Kuormituksen kasvun on ennustettu olevan 2 % vuodessa 20 vuoden pitoajalla. Reaalikorkokannaksi valittiin 5 % ja alueen huipun käyttöajan oletettiin olevan 2 000 h. Kuormituksen kasvun lisäksi mitoituksessa otettiin huomioon mahdolliset hetkelliset ylikuormitustilanteet valitsemalla kuormitustehon mitoituskerroimeksi 1,25. Johdoille resistanssit määrättiin 60 °C:n lämpötilalle. Kaapeleiden tasajänniteresistanssien ero vaihtojänniteresistansseihin saatiin kaapeleiden valmistajien tuotetiedoista.

Taulukko 10-6. Kustannusvertailuparametrit.

	AC/ DC	Muuntajan/ Suuntaajan koko	Kuormitus- aste	Luku- määrä	Johto- pituus	Kuormitus- tiheys	Johtotyyppi
1	AC	1 MVA	50 %	8	4 km	0,5 MVA/km	AHXAMK-W
2	AC	1 MVA	70 %	8	4 km	0,5 MVA/km	AHXAMK-W
3	AC	0,50 MVA	100 %	8	4 km	0,5 MVA/km	AHXAMK-W
4	AC	0,25 MVA	100 %	15	4 km	0,5 MVA/km	AHXAMK-W
5	DC	0,50 MVA	100 %	8	4 km	0,5 MVA/km	AHXAMK-W
6	DC	0,50 MVA	100 %	8	4 km	0,5 MVA/km	HXCMK

Johtohäviöiden lisäksi laskennassa huomioitiin muuntajien kuormitushäviöt nimelliskuormalla, jotka riippuvat neliöllisesti muuntajan kuormituksesta. Tästä syystä muuttaman suuren muuntajan kuormitushäviöt 50 %:n nimelliskuormalla olivat huomattavasti pienemmät kuin usean vastaavan nimellistehon omaavien muuntajien kuormitushäviöt. Pienempien muuntajien investointikustannukset kuitenkin olivat vastaavasti edullisemmat.

Muuntajissa tapahtuvat tyhjäkäyntihäviöt otettiin myös mukaan häviökustannusten määrittämiseen. Toisin kuin kuormitushäviöt, tyhjäkäyntihäviöt eivät riipu muuntajan kuormituksesta juuri lainkaan, vaan ovat jokaiselle muuntajalle ominaiset. Tästä syystä myös tyhjäkäyntihäviökustannusten diskonttauksessa tulee ottaa huomioon, että ne eivät kasva neliöllisesti kuormitushäviöiden tavoin. Näin ollen tulee käyttää eri kapitalisointikerrointa kuin kuormitushäviökustannusten laskennassa. [3]

Suuntaajille määritettiin häviökustannukset laskemalla niiden kytkin- ja johtohäviöt. Johtohäviöt määritettiin kaavan (34) mukaisesti. Kaavasta (34) nähdään, että johtohäviöiden suuruus riippuu kuormituksen kasvusta neliöllisesti, joten tästä syystä kapitalisointikerrointa käytettiin muuntajan kuormitushäviöiden kerrointa. [67]

$$P_{cond} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{on} \cdot I_{rms}}{\pi} + r_{on} \cdot I_{rms}^2 \quad (34)$$

$V_{on}$  on johtavantilan jännitehäviö

$I_{rms}$  on kuormitusvirta

$r_{on}$  on johtavantilan resistanssi

$P_{cond}$  suuntaajan johtohäviöt.

Kaavasta (35) nähdään, että kytkentähäviöihin vaikuttaa eniten kytkentätaajuus, kuormitusvirta ja suuntaajan nimellvirta. Kytkentähäviökustannuksien määrittämiseen voitiin

käyttää muuntajan tyhjäkäynnin kapitalisointikerrointa, koska tyhjäkäyntihäviöiden ta-  
paan kytkentähäviöt riippuvat lineaarisesti suuntaajan koosta ja kuormasta. Suuntaaja ole-  
tettiin toteutettavan ABB:n moduuleilla, joiden tuotetiedoista moduuleille valittiin tyypil-  
liset arvot, jotta häviöt voitiin määrittää kustannusvertailulle riittävällä tarkkuudella. [67]

$$P_{sw} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_{rms}}{I_{nom}} \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw} + E_{rr} \cdot f_{sw} \quad (35)$$

$I_{nom}$  on suuntaajan nimellisvirta

$I_{rms}$  on kuormitusvirta

$f_{sw}$  on puolijohdekytkimien kytkentätaajuus

$E_{on}$  on päällekytkennän energiahäviö

$E_{off}$  on poiskytkennän energiahäviö

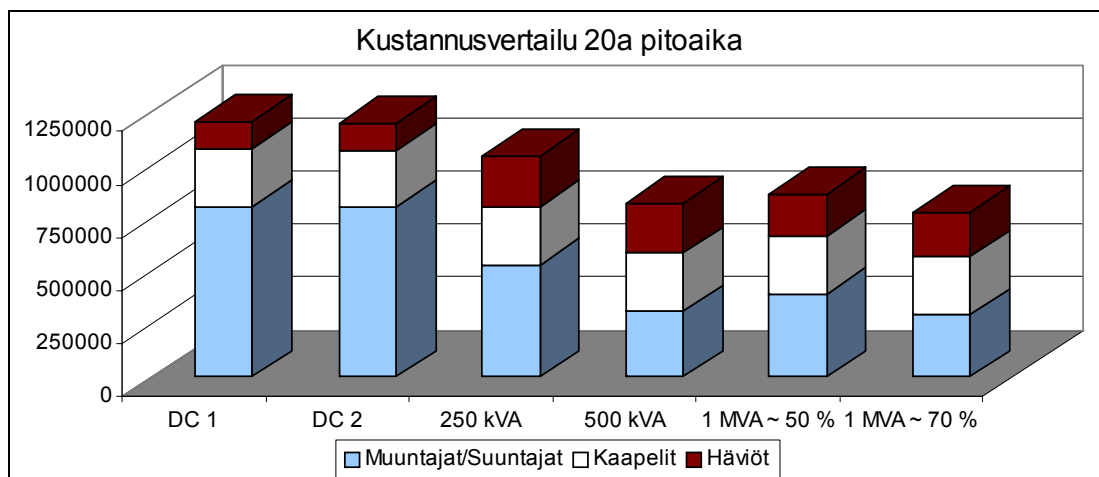
$E_{rr}$  on estosuunnan energiahäviö

$P_{sw}$  on suuntaajan kytkentähäviöt.

### 10.3.3 Kustannusvertailun tulokset

Kustannusvertailun luonteesta johtuen kustannuksia on vaikea verrata todelliseen vas-  
taavan kokoiseen jakeluverkkoon, koska kokonaiskustannuksista jätettiin pois sellaiset  
komponentit ja verkon osat, jotka eivät vaikuttaneet merkittävästi kustannusvertailun  
tuloksiin. Muuntajien ja suuntaajien kappalemäärät on määritetty niiden nimellistehon ja  
20 vuoden päästä tarvittavan mitoitustehon mukaisesti.

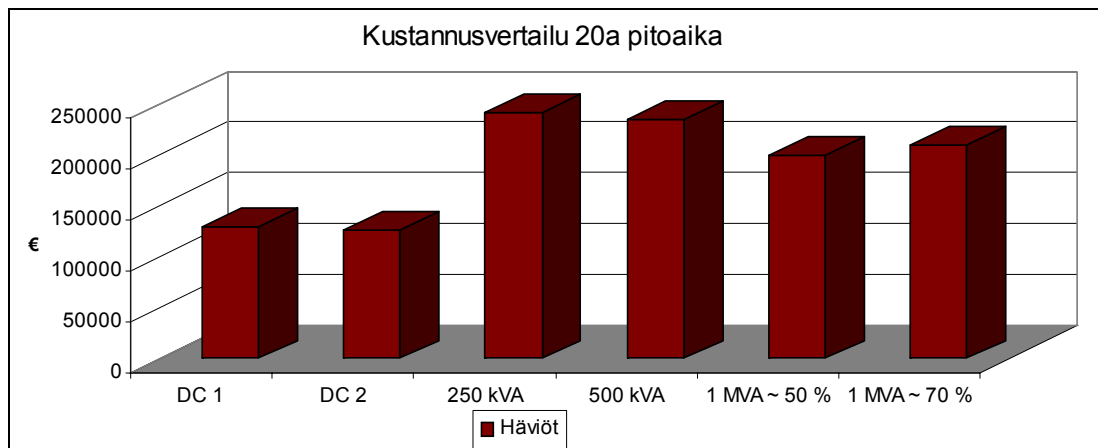
Tässä vertailussa käytetyssä keskijännitejakeluverkossa tasajännitejärjestelmän koko-  
naiskustannukset ovat suurempia kuin vaihtojänniteverkon. Se hyöty mikä tasajännitettä  
käytettäessä saavutetaan tietyllä tehoalueella, ei päde tämän kustannusvertailun kuormi-  
tustiheydellä. Kaapelikustannuksissa on lähes mahdotonta säästää, kun tasajännitekaa-  
peleina joudutaan käyttämään vaihtojännitteelle tarkoitettuja yksijohdinkaapeleita. On-  
gelmia voi syntyä etenkin, jos joudutaan käyttämään polariteettikäntöä, kuten HVDC-  
järjestelmissä. Vaihtojännitteelle tarkoitettujen yksijohdinkaapeleiden eristeet eivät to-  
dennäköisesti kestäisi tätä, koska avaruusvarauksien käyttäytymistä ei tunneta nopean  
polariteettikäntön aikana. Erään kaapelivalmistajan mukaan on vaikea ennakoida vaih-  
tojännitekaapeleiden eristeiden käyttäytymistä tasajännitteellä. Arviona onkin, että eris-  
teissä tulisi käyttää erikoisseoksia. [68]



Kuva 10-3. Taajaman keskijännitejakojärjestelmien kokonaiskustannuserot.

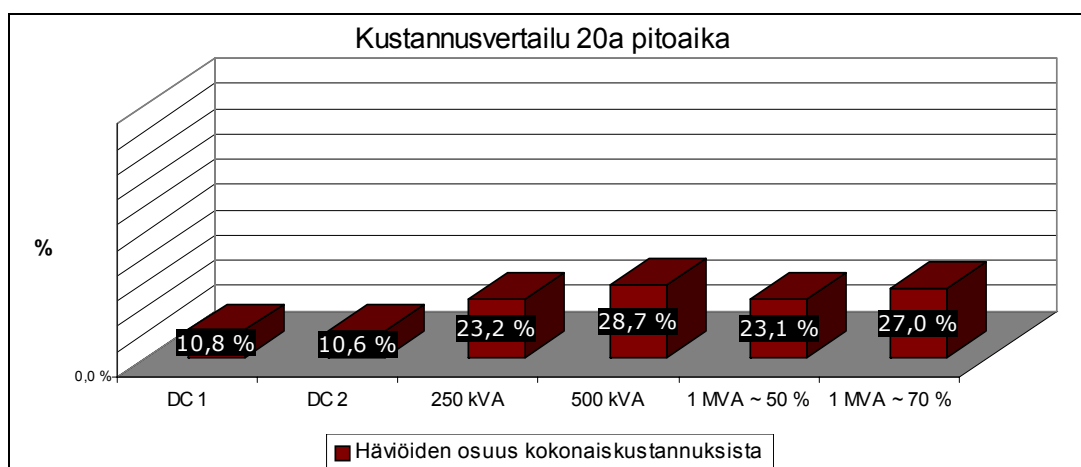
Tässä työssä käytettiin kuitenkin yksinjohdinkaapeleiden hintoina vastaavia vaihtojännitteellä tarkoitettujen yksinjohdinkaapeleiden hintoja. Jos nämä kaapelit eivät kuitenkaan täysin sovellu tasajännitesovelluksiin, joudutaan todennäköisesti kehittämään uusia ja vahvemalla eristyksellä varustettuja kaapeleita. Tämä voisi mahdollisesti nostaa tasajännitejakojärjestelmän kustannuksia entisestään.

Kuva 10-4 tuo esille kustannusvertailussa laskettujen häviökustannusten erot. Kuvasta voidaan nähdä, että tasajännitejakojärjestelmällä saavutetaan pienemmät häviökustannukset kuin vaihtojännitteellä silloin, kun johtopituudet ja kuormitusasteet ovat yhtä suuret. Tasajännitejakojärjestelmä on tästä näkökulmasta lähes puolet halvempi. Tämä selittyy sillä, että kaapeleiden DC-resistanssi on huomattavasti pienempi, jolloin tasajännitekaapeleiden häviöteho jäi kolmasosaan vaihtojännitteestä. Häviöihin vaikutti myös se, että tasajännitteellä käytettiin 13,5 kV:n jännitettä, kun vaihtojännitteellä oli 10 kV. Kuvasta voidaan nähdä 1 MVA:n muuntajan häviökustannusten ero, kun kuormitusaste nousee 50 %:sta 70 %:iin. Kustannusero on 50 % kuormitusasteen eduksi, noin 10 000 €. Kokonaisuudessaan kuitenkin suuremmalla kuormitusasteella toimivat 1 MVA:n muuntajat tulevat halvemmiksi, koska niitä tarvitaan 8 kappaleen sijaan 6 kpl. Käytettäessä pienempiä jakelumuuntajia kustannusero 70 %:lla kuormitettuun 1 MVA:n muuntajaan kasvaa noin 40 000 €.



Kuva 10-4. Taajaman keskijänniteverkossa DC-jakelujärjestelmän häviökustannusten edullisuus verrattuna vaihtojännitejakeluun. Kuormitusiheys 0,5 MVA ja johtopituus 4 km.

Kuva 10-5. tuo esille häviökustannusten osuuden vastaavan järjestelmän kokonaiskustannuksista. Huomataan, että häviökustannusten suhteissa ei ole suuria eroja vaihtojännitteellä. Ainoa merkittävä muutos on havaittavissa 250 kVA:n ja 500 kVA:n muuntajien suhteellisissa häviökustannuksissa. Tämä tarkoittaa siis sitä, että 250 kVA:n muuntajilla toteutetulla järjestelmällä on huomattavasti suuremmat kokonaiskustannukset.



Kuva 10-5. Taajaman keskijännitejakeluverkkojärjestelmien häviökustannusten osuus kokonaiskustannuksista.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka taajaman keskijännitejakelussa tasajännitejärjestelmällä häviökustannukset jäävät pieniksi, syntyy järjestelmän rakennusvaiheessa huomattava määrä investointikustannuksia. Tässä työssä tarkasteltavan jakeluverkon osan kustannuksiksi tasajännitteellä kertyi noin 1,1 milj. euroa 20 vuoden pitoajalla. Halvimman vaihtojännitejärjestelmän kokonaiskustannukset jäivät 0,8 milj. euroon. Näiden tulosten perusteella tasajännitteen käyttöä taajaman keskijännitejakelussa on vaikea perustella kustannussäästöillä. Tällä hetkellä perusteluina voitaisiin pitää sähkön



laadullisia tekijöitä ja parempaa valmiutta hajautetun tuotannon implementointiin. Kustannusvertailu olisi kuitenkin erilainen, jos mukaan otettaisiin koko pienjännitejakeluverkko, koska pienjännitteellä ei tarvita ylimääräisiä muuntajia, tehoelektroniikan hinnat ovat huomattavasti kohtuullisempia ja vaihdettaessa vaihtojännitejärjestelmä tasajännitteelle vanhojen siirtojohtojen kapasiteetti voidaan hyödyntää tehokkaammin.

Kustannuksiin epävarmuutta tuova seikka ovat suuntaajien hinnat. Suuntaajien hinnat koostuvat pääasiassa kalliista puolijohdekytkimistä, suodattimista ja muusta ohjaus-elektroniikasta. Yksinkertaisten tasa- ja vaihtosuuntaajien hinnat voidaan määrittää esimerkiksi taajuusmuuttajavalmistajien kokemusten perusteella. Kuitenkin asetettaessa korkeita vaatimuksia suuntaajien ohjaukselle ja kommunikointilaitteille hajautettua energian tuotantoa varten on vaadittavien lisäominaisuuksien kustannuksia vaikea määrittää tarkasti. Tässä työssä suuntaajien hinnaksi arvostettiin 100 €/kW, joka todennäköisesti on hieman liikaa. Tasajännitejärjestelmässä tarvitaan pääsuuntaajan lisäksi ns. jakelusuuntaajia, joiden vuoksi nousevat suuntaajista aiheutuvat investointikustannukset erittäin suuriksi verrattaessa häviökustannuksiin. Pääasiassa suuntaajien hinnan arvostus ratkaisee kustannusvertailun tuloksen, koska kaapeleista aiheutuvat kustannukset keski-jännitteellä ovat tasa- ja vaihtojännitejärjestelmissä jokseenkin samat ja vakaat.

*Taulukko 10-7. Suuntaajille määritetty sallittu maksimihinta, jotta tasa- ja vaihtojännitejärjestelmien kustannukset olisivat samat.*

<b>Tarvittava suuntaajien kustannus</b>	Arvo	Yksikkö
Suuntaajien alkuperäinen hinta	100	€/kW
AC-kustannusten keskiarvo	874 183	€
DC-kustannusten keskiarvo	1 199 134	€
Erotus	324 951	€
4 000 kW:n syöttö ja kuormat	800 000	€
Verrannolla laskettu alennus	41	€/kW
Suuntaajille tarvittava hinta	59	€/kW

Tässä työssä tehtyjen laskelmien perusteella suuntaajien hintakehityksen tulisi olla ainakin -5 %/a seuraavan 10 vuoden aikana, jotta tasajännitejärjestelmä tulisi samanhintaiseksi vaihtojännitejärjestelmän kanssa. Tämä on periaatteessa mahdollista viimeaikaisen tehoelektroniikan hintakehityksen valossa.

# 11. Yhteenveto

## 11.1 Nykyinen sähköjakelu taajamassa

Työn alussa käytiin läpi pääpiirteittäin taajaman sähköjakelunverkon tekniset ominaisuudet. Lisäksi tuotiin esille erilaisia AC-verkon ongelmia, joita DC-verkoissa ei esiintyisi lainkaan. Nykyisen kaltaisella sähköjakeluverkolla on käytännössä saavutettu sen teknistaloudelliset rajat. Vaikka teknisesti olisi mahdollista muuttaa nykyinen jakeluverkko täysin vikaimmuuniksi, se ei ole sähköyhtiöiden kannalta taloudellisesti kannattavaa. Siksi käsiteltiin nykyisin Suomessa esiintyvien käyttökatkosten määrää taajaman jakeluverkoissa, millä pyritään tuomaan esille sitä, että tarvittaisiin uudenlaisia teknisiä ratkaisuja katkosten välttämiseksi. AC-jakeluverkon kuvaamisella pyritään luomaan vertailukohtia myöhemmin esiin tuotavalle DC-jakeluverkolle, jolloin sen suomia etuja on helpompi havainnollistaa.

Työn pohjimmaisena teemana on sähkön laadun parantaminen, jonka vuoksi tuotiin esille lukuisia AC-verkolle tarkoitettuja FACTS-laitteita. Niiden ideana on pyrkiä ehkäisemään tai korjaamaan nykyisessä jakelujärjestelmässä esiintyviä häiriöitä. Vaihtoehtona FACTS-laitteille voitaisiin koko jakeluverkko rakentaa keskitetysti varmennetuksi. Toisaalta taas mm. sähkölaatuasema-/ FRIENDS-konseptissa pyritään tarjoamaan erilaatuista sähköä asiakkaiden tarpeiden mukaan.

Työssä pyrittiin tuomaan esille myös sähköyhtiöiden roolia jakeluverkkojen ylläpitäjinä ja kehittäjinä, ja sitä kuinka niiden kohtuullisen voiton tavoittelu osaltaan hidastaa jakeluverkkojen kehittämistä. Pohjoismaiden välinen suhteellisen uusi sähkömarkkina on jo nyt vaikuttanut suuresti sähköyhtiöiden organisaatorakenteisiin. Tulevaisuudessa hajautetun tuotannon myötä vaikutukset varmasti näkyvät vielä selvemmin sähköyhtiöissä. Myös sähkömarkkinan täytyy reagoida muutokseen, jotta jokaisella on mahdollisuus myydä sähköenergiaa. Sähköyhtiöiden tulevaa roolia muuttuvassa markkinaympäristössä on vaikeaa ennakoida, koska todennäköisesti energia-alalle tulee syntymään runsaasti uusia toimijoita ja osapuolia, joita käytiin läpi luvussa 8.

## 11.2 DC-jakelu, energiavarastointi ja mikroverkko

Työssä tuotiin aluksi esille DC-verkon mahdollisia eri osia ja pääasiallisia komponentteja. DC-verkossa voitaisiin hyödyntää pääosin jo olemassa olevia verkon komponentteja. Yksi suurista kysymyksistä on se, käytettäisiinkö DC-verkkoa taajamassa jo olevilla kaapeleilla vai rakennettaisiinkö AC-järjestelmälle rinnakkainen täysin oma DC-verkko. Luonnollisesti säästettäisiin huomattavasti varoja kaapelikustannuksissa käytettäessä vanhaa verkkoa, mutta vanhojen kaapeleiden soveltuvuudesta uuden järjestelmän tarpeisiin ei ole juurikaan tutkimuksia.

DC-jakeluverkon suojaukseen ja ohjaukseen liittyviä ongelmia ja monista eri tutkimuksista kerättyjä ratkaisuja kuvailtiin luvussa 3. Yhtenä suurena ongelmana voidaan pitää yhtenäisen standardin ja käytännön ohjeistuksen puuttumista. Esimerkiksi verkkoonliityntälaitteiden ohjausmetodien tulisi olla kaikilla yhteiset, jotta verkko toimisi oikein. DC-verkon maasulkuvikoihin liittyviä näkökohtia käsiteltiin vain lyhyesti, koska se yksinään suuri kokonaisuus, joka vaatii todennäköisesti vielä paljon lisätutkimusta.

Energiavarastojen roolia DC-verkon varmentamisessa ja energian hallinnassa käsiteltiin varsin laajasti, koska niillä tulisi olemaan erittäin tärkeä rooli hajautettua tuotantoa omaavissa mikroverkoissa. Voitiin myös havaita, että DC-verkot tarjoaisivat paremmat mahdollisuudet energiavarastojen hyödyntämiseen energian hallinnassa. Tämän lisäksi pohdittiin, millaisia toimijoita tarvittaisiin hajautetulla tuotannolla ja energiavarastoilla varmennetun DC-mikroverkon ylläpitämiseen. Myös sähköyhtiöiden roolia hajautetussa energiajärjestelmässä tuotiin esille. Yleisesti ottaen DC-jakeluverkko tarjoaisi runsaasti uusia mahdollisuuksia sekä sähköyhtiölle että asiakkaille. Alalla syntyisi myös uusia palveluita ja tuotteita.

### **11.3 DC-verkko suomalaisen taajaman jakeluverkkona**

Luvussa 3 pohdittiin, millaiset DC-jakeluverkkojärjestelmät sopisivat taajamaan. Konseptien suunnittelu tapahtui nykyisten olemassa olevien AC-järjestelmien pohjalta. Tällä tarkoitetaan sitä, että DC-jakeluverkko olisi mahdollisimman helppo implementoida osaksi perinteistä jakeluverkkoa. Tällä tavoin etenkin DC-jakeluverkon nimellisjännitteen valinnalle saatiin looginen perustelu.

Itse DC-jakeluverkon sisäinen rakenne pyrittiin muodostamaan siten, että sekä sähköyhtiöille ja asiakkaille koituisi mahdollisimman vähän kustannuksia. Pyrittiin eliminoidaan pienten jakelumuuntajien tarve kokonaan. Tuotiin esille sekä pienjänniteasiakkaille että keskijänniteasiakkaille tarkoitetut DC-verkot.

Pienjänniteasiakkaiden DC-verkkoa pyrittiin luonnehtimaan yleiseksi ratkaisuksi, joka soveltuisi hyvin suomalaisen taajaman jakeluverkkojärjestelmäksi. Kuormien DC/AC-suuntaajien sijoittamista katujakomoihin perusteltiin sillä, että ainoastaan yhden kotitalouden ollessa kytkettynä DC-verkon liityntälaitteeseen laskisi sen hyötysuhde ajoittain hyvin alas. Lisäksi keskitetyillä DC/AC-suuntaajilla asiakkaille ei aiheutuisi suoria kustannuksia jakeluverkon muutoksesta lainkaan.

Energiavarastoilla ja varavoimalla varmennettua keskijännite-DC-verkkoa luonnehdittiin enemmänkin kustomoiduksi ratkaisuksi tietyille alueille, joissa voi sijaita useita korkeasta sähköön laadusta kiinnostuneita asiakkaita. Lisäksi kuvailtiin erilaisia mikro-

verkkoja, kuten yhden asiakkaan mikroverkko, joka voi erota verkosta mahdollisissa vikatapauksissa. Tällaisia mikroverkkoja voidaan hyödyntää esimerkiksi suurissa toimistorakennuksissa, joissa suuri osa sähköenergiasta käytetään muutenkin DC-jännitteenä. Varmennetun keskijännite-DC-verkon ja toimistorakennusten sisäisten mikroverkkojen yhteisellä sovittamisella voitaisiin saada aikaan erittäin hyvä sähkön laatu ja toimitusvarmuus. Lisäksi säästettäisiin energiaa välttämällä ylimääräisiä muunnoksia vaihto- ja tasajännitteiden välillä.

## 11.4 Hyödyt ja SWOT-analyysi

Taulukko 11-1 tuo esille taajamaan soveltuvan varmennetun DC-jakeluverkon vahvuuksia ja heikkouksia. Vaikka työn tarkoituksena on tutkia, mitä hyötynäkökulmia DC-jakeluverkolla olisi tarjottavana, on silti otettava huomioon mahdolliset uhat ja heikkoudet, jotta mahdollisessa toteutusvaiheessa välttyttäisiin virheiltä. Suurimpana uhkana DC-verkkojen menestykselle ovat luultavasti perinteiseen AC-verkkoon soveltuvat sähkön laadun hallinnan laitteet (FACTS).

*Taulukko 11-1. Tasajänniteverkon SWOT-analyysi.*

Mahdollisuudet	Uhat
Hajautetun tuotannon yleistyminen (polttokennöt ja aurinkosähkö) Suuri kysyntä korkealle sähkön laadulle Laajojen sähkökatkokkien aiheuttamat haitat Pilottihankkeet Sähköyhtiöiden kiinnostus Tietotekniikan lisääntyminen (sisäinen DC) Loppuasiakkaan päässä pitkällä tähtäyksellä energiatehokkuus paranee	DC-verkko häiritsee AC-verkkoa? DC-jännitteen vaarallisuus / turvallisuus Kilpailevat teknologiat (FRIENDS, FACTS)
Vahvuudet	Heikkoudet
Hajautetun tuotannon integrointi Energiavarastojen integrointi Parempi sähkön laatu Uudet palvelut ja tuotteet Muuntajatiheys verkossa laskee Yksinkertaisemmat suuntaajat Siirtokapasiteetti suurempi johdinyksikköä kohti Pienempi jännitteenalenema	Implementointi käytännössä Suunnittelu-, asennus- ja huoltokonseptit puuttuvat Laitteiden saatavuus Ei varsinaisia standardeja Suojauksen toteutus Kustannuskysymykset

## 11.5 Kannattavuus

Työn tavoitteena oli myös selvittää mahdollisen tasajännitejakeluverkon kustannuksia ja verrata niitä perinteiseen vaihtojännitejärjestelmään. Aluksi tuotiin esille perinteiselle järjestelmälle sovellettavia laskentamenetelmiä elinkaarikustannusten määrittämiseksi. Lisäksi pyrittiin kuvaamaan tarkemmin niitä verkon osia, jotka olivat kustannusvertailun kannalta mielenkiintoisia. Kustannustarkastelussa keskityttiin tarkastelemaan DC-jakeluverkon välijänniteosuuden kustannuksia, sillä se on todennäköisesti ensimmäiseksi toteutettavissa oleva osuus taajama-alueen DC-jakelua.

Tämän jälkeen tuotiin esille tasajänniteverkon osia, joiden oletettiin vastaavan vaihtojänniteverkon perinteisiä komponentteja. Tällä tavoin voitiin muodostaa molemmille vaihtoehdoille mahdollisimman tasavertainen lähtökohta kustannusvertailua varten. Tasajänniteverkon elinkaarikustannusten määrittämiseen sovellettiin perinteisiä laskukaavoja ottaen huomioon mahdolliset neliöllisten häviökustannusten muodostumiset.

Työssä pyrittiin erityisesti kiinnittämään huomiota kaapeleista aiheutuviin kustannuksiin. Valmistajilta saatujen hintojen perusteella keskijännitteellä ei saavutettu minkäänlaista kustannushyötyä käytettäessä tasajännitteellä kahta yksinjohdinkaapelia vanhan kolmijohdinkaapelin sijasta. Lisäksi käytettäessä tasajännitejärjestelmää keskijännitteellä ei välttämättä kaikkia muuntajia voida korvata suuntaajilla, kuten pientasajänniteverkoissa on mahdollista. Tästä syystä keskijännitteellä tasajännitejakelujärjestelmä on merkittävästi kalliimpi kuin vaihtojännitejärjestelmä, vaikka pienjännitejärjestelmässä toisaalta voidaan saavuttaa selkeitä säästöjä. Pääasiassa vaihtojännitejärjestelmä on investointikustannuksiltaan halvempi, mutta tasajännitejärjestelmällä häviökustannukset myös keskijännitteellä jäävät jopa puoleen vaihtojännitejärjestelmän vastaavista.

Kustannusvertailun tuloksista voitiin havaita, että suurinta epävarmuutta tuloksiin aiheutti tasajännitejärjestelmässä tarvittavien suuntaajien kustannus. Oletetun kustannuksen pohjalta pyrittiin arvioimaan vaatimusta suuntaajien hintakehitykselle seuraavan 10 vuoden aikana, jotta tasajännitejärjestelmä olisi varteenotettava vaihtoehto kustannustenkin valossa.

## 11.6 Jatkokehitys ja tulevaisuuden näkymät

DC-jakeluverkon kehityksen kannalta olisi erittäin tärkeää, että sille laadittaisiin oma standardi. Jos olisi standardi, yhä useammat yritykset uskaltaisivat lähteä sijoittamaan DC-jakeluverkkoihin tarvittavien komponenttien tuotekehitykseen. Etenkin DC-jakeluverkkoon tarvittavien liityntälaitteiden ohjauksen ja suojausten kehittämiseen tulisi panostaa. Näin luotaisiin tekninen perusta DC-jakeluverkkojen käyttöönotolle.

DC-jakeluverkossa voisi tulevaisuudessa olla kytkettyinä useita AC/DC-suuntaajia yhtä aikaa. Niiden rinnankäyttö tulisi olemaan erittäin haasteellista. Kuten jo työssä aieminkin todettiin, on erittäin epätodennäköistä, että DC-jakeluverkon jännitettä pidettäisiin yllä ainoastaan lukuisten pienten tuotantoyksiköiden varassa. Todennäköisin kuva tulevaisuudesta voisi olla DC-verkko, jossa on muutama suuri tuotantoyksikkö ja paljon pieniä. Pienillä tuottajilla ei kuitenkaan olisi juurikaan vaikutusta verkon jännitteen ylläpitoon. Lisäksi olisi hyvä tutkia, millaisia vaikutuksia aiheutuu AC-puolella olevista erittäin epäsymmetrisistä kuormista AC/DC-suuntaajille ja välittyisivätkö ne DC-verkkoon. Esimerkiksi omakotitalon kolmivaihekuormituksen epäsymmetrian huomioon ottaminen voisi hankaloittaa suuntaajalaitteiden suunnittelua.

Jotta DC-jakeluverkkojen kehitystä voitaisiin jatkaa, tulisi olla tarkempaa tietoa järjestelmän todellisista kustannuksista. Kustannuslaskelmiin tulisi sisällyttää komponenttien hinnat, järjestelmien asennuskulut ja ylläpitokustannukset. Etenkin taajamissa uusien maakaapeleiden vetäminen maksaa paljon, koska joudutaan tekemään erikoisjärjestelyjä. Kun on tiedossa DC-jakelujärjestelmän optimaalinen kustannusarvio, voidaan laskea korkeammalle sähkön laadulle jokin hinta ja sitä kautta etsiä kiinnostuneita asiakkaita pilottihankkeelle. Suomalainen pilottihanke voitaisiin aluksi toteuttaa vain erittäin pienimuotoisena DC-mikroverkkona. Se olisi järkevää rakentaa nykyisen järjestelmän rinnalle, jolloin sen kokeilu olisi turvallista ja toimintahäiriöissä voitaisiin vielä turvautua perinteiseen järjestelmään.

## Lähdeluettelo

- [1] Agelidis, V. G., Dementriades, G. D. & Flourentzou. 1998. Recent Advances in High-Voltage Direct-Current Power Transmission Systems. ABB Review, Vol. 1, s. 4–9. Internet: <http://search.abb.com/library/ABBLibrary.asp?DocumentID=9AKK101130D3802&LanguageCode=en&DocumentPartID=&Action=Launch> [Viitattu 26.5.2007]
- [2] Kylkisalo, T. 2007. Tasajännitteen ja energiavarastoinnin hyödyntäminen taajaman sähköjakelussa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto.
- [3] Lakervi, E. & Partanen, J. 2006. Sähköjakelutekniikka-kirja, draft. S. 2–7. Internet: <http://www.ee.lut.fi/fi/materiaali/sahkonjakelutekniikka-kirja-22-1-06.pdf> [Viitattu 23.5.2006]
- [4] Eduskunta, Sähkömarkkinalaki 386/1995. 3. luku. Internet: [http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/sahkomarkkinalaki\\_386-1995.pdf](http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/sahkomarkkinalaki_386-1995.pdf) [Viitattu 24.5.2006]
- [5] Järventausta, P., Tahvainen, K., Viljainen, S., Lassila, J., Partanen, J., Kivikko, K., Mäkinen, A. & Honkapuro, S. DEA-mallilla suoritettavan tehokkuusmittauksen kehittäminen. Lappeenrannan Yliopisto. Internet: [http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/DEA-jatkokehitys\\_LUT\\_20061208.pdf](http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/DEA-jatkokehitys_LUT_20061208.pdf) [Viitattu 3.1.2007]
- [6] ABB TTT-käsikirja. 2000/07, luku 4. Sähkön laatu, s. 1, 8–10. Internet: [http://www.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/040\\_0007.pdf](http://www.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/040_0007.pdf) [Viitattu 24.5.2006]
- [7] Sähköverkko – Opus. 1997. Tampereen teknillinen yliopisto, Internet: <http://leeh.ee.tut.fi/opus/JALENEMA.HTM> [Viitattu 31.5.2006]
- [8] ABB TTT-käsikirja, 2000/07, luku 19. Sähköjohtojen mitoittaminen, s. 1–2. Internet: [http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/191\\_0007.pdf](http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/191_0007.pdf) [Viitattu 31.5.2006]
- [9] Energiateollisuus, Sähköverkko – jakeluverkko. 2006. Internet: <http://www.energia.fi/page.asp?Section=4418> [Viitattu 1.6.2006]

- [10] Energiateollisuus, Sähkökäyttö ja verkostohäviöt – tilastot. 2006. Internet: <http://www.energia.fi/page.asp?Section=2770> [Viitattu 1.6.2006]
- [11] Ministry of Power, Government of India. 2006. Internet: [http://powermin.nic.in/JSP\\_SERVLETS/internal.jsp?query=T&D%20loss&searchin=all](http://powermin.nic.in/JSP_SERVLETS/internal.jsp?query=T&D%20loss&searchin=all) [Viitattu 1.6.2006]
- [12] ABB esite – THF-yliaaltosuodatin. ABB Control Oy, 1996. Internet: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/662C86451B71D70DC1256C5500269561/\\$File/THF11FI96\\_04.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/662C86451B71D70DC1256C5500269561/$File/THF11FI96_04.pdf) [Viitattu 2.6.2006]
- [13] Dranetz BMI, Power Monitoring Experts, Kuva. Internet: <http://www.dranetz-bmi.com/newsletter/5-2004/index.cfm> [Viitattu 6.6.2006]
- [14] Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. Yliaalto – opus. Tampereen teknillinen yliopisto. Internet: <http://leeh.ee.tut.fi/ylialto/fou.htm> [Viitattu 2.6.2006]
- [15] Laasonen, M. Siirtoverkon jännitteen ja loistehotaseen säätö, Fingrid Oy, luento TKK 8.11.2005. Internet: <http://powersystems.tkk.fi/opinnot/S-18.113/Luento%20081105.pdf> [Viitattu 6.6.2006]
- [16] Hinnastot sähköyhtiöiden Internet-sivuilta: [www.helsinginenergia.fi](http://www.helsinginenergia.fi), [www.vantaanenergia.fi](http://www.vantaanenergia.fi), [www.vaasansahko.fi](http://www.vaasansahko.fi), [www.oulunenergia.fi](http://www.oulunenergia.fi), [www.fortum.fi](http://www.fortum.fi), [www.raumanenergia.fi](http://www.raumanenergia.fi), [Viitattu 5.6.2006]
- [17] Gengyin, L., Ming, Z., Juan, Y. & Liying, S. 2004. Research on Procurement Strategy of Reactive Power as Auxiliary Service in Power Markets. IEEE. Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9285/29521/01338520.pdf?tp=&arnumber=1338520&isnumber=29521> [Viitattu 5.6.2006]
- [18] NYSEG - New York State Electric & Gas Corporation. 2006. Internet: [http://www.nyseg.com/nysegweb/webcontent.nsf/Lookup/LdProfile/\\$file/dtp0103.xls](http://www.nyseg.com/nysegweb/webcontent.nsf/Lookup/LdProfile/$file/dtp0103.xls) [Viitattu 6.6.2006]
- [19] Sähkö- ja teleurakointiliitto. Rakennussähköistyskansio 1. ST-kortti 13.31 – kohta 3.3, [Viitattu 7.6.2006]
- [20] Rauman Energia Oy & Vakka Suomen Voima Oy. 2000. Erikoisohjekansio – 5.01 Loistehon kompensointitavan valinta. Internet: <http://www.satavakka.fi/skansio/docs/50100.doc> [Viitattu 7.6.2006]



- [21] Energiateollisuus – Tilastot, Keskeystilasto. 2003. S. 14. Internet: <http://www.energia.fi/attachment.asp?Section=3827&Item=16190> [Viitattu 7.6.2006]
- [22] Järventausta, P. 2003. Sähköverkon luotettavuus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Power 2010 – Energia-alan tulevaisuus, 6.11.2003. Internet: [https://www.pirkanmaanennakointipalvelu.info/micaj\\_storage/01F63571B11E6C39C85D83C772372099/3577/pertti\\_j%E4rventausta\\_esitys.pdf](https://www.pirkanmaanennakointipalvelu.info/micaj_storage/01F63571B11E6C39C85D83C772372099/3577/pertti_j%E4rventausta_esitys.pdf) [Viitattu 8.6.2006]
- [23] Alanen, R. & Hätönen, H. 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta – State of the art selvitys, VTT, VTT Working Papers 52, s. 40–42. Internet: <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf> [Viitattu 8.6.2003]
- [24] Kaipia, T., Lohjala, J., Lassila, J. & Partanen, J. 2005. 1000 V jakelujärjestelmän teknistaloudellinen kannattavuus. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Internet: [http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2710500/1000V\\_jakelu.pdf](http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2710500/1000V_jakelu.pdf) [Viitattu 9.6.2006]
- [25] Järventausta, P., Mäkinen, A., Nikander, A., Kivikko, K., Partanen, J., Lassila, J., Viljainen, S. & Honkapuro, S. 2003. Sähkön laatu jakeluverkkotoiminnan arvioinnissa. Tampereen ja Lappeenrannan teknilliset yliopistot, 1/2003, s. 35. Internet: [http://www.ee.lut.fi/fi/lab/sahkomarkkina/tutkimus/Sahkon\\_laatu\\_jakeluverkkotoiminnan\\_arvioinnissa.pdf](http://www.ee.lut.fi/fi/lab/sahkomarkkina/tutkimus/Sahkon_laatu_jakeluverkkotoiminnan_arvioinnissa.pdf) [Viitattu 9.6.2006]
- [26] Laukamp, H. 1996. The New German Safety Standard for Residential PV Systems. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/iel3/4263/12206/00564397.pdf?isnumber=&arnumber=564397> [Viitattu 13.6.2006]
- [27] Karlsson, P. 2002. Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. DC Distributed Power Systems – Analysis, Design and Control for a Renewable Energy System. Internet: <http://www.iea.lth.se/~ielper/DistributedPowerSystems/PhDThesisPK.pdf> [Viitattu 13.6.2006]
- [28] Karlsson, P. & Svensson, J. Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. 2003. EPE 2003 Conference Proceedings, Voltage Control and Load Sharing in DC Distribution Systems. Internet: <http://www.iea.lth.se/~ielper/DistributedPowerSystems/EPE2003-paper.pdf> [Viitattu 14.6.2006]
- [29] Standard EN 50163-1 Railway Applications. Supply Voltages for Traction Systems, GENELEC. [Viitattu 28.11.2006]

- [30] Karlsson, P. & Svensson, J. 2002. Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. DC Bus Voltage Control for Distributed Power System. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/63/27869/01243700.pdf?isNumber=27869&prod=JNL&arnumber=1243700&arSt=+1405&ared=+1412&arAuthor=+Karlsson%2C+P.%3B++Svensson%2C+J>. [Viitattu 14.6.2006]
- [31] Ito, Y., Zhongqing, Y. & Akagi, H. Mayway Labs Co. Ltd, DC Micro-grid Based Distribution Power Generation System. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9465/30041/01377011.pdf?arnumber=1377011>  
[Viitattu 14.6.2006]
- [32] Karlsson, P. & Svensson, J. 2002. Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. NORPIE 2002 Conference Proceedings, Fault Detection and Clearance in DC Distributed Power Systems. Internet:  
<http://www.iea.lth.se/~ielper/DistributedPowerSystems/NORPIE2002-paper.pdf>  
[Viitattu 16.6.2006]
- [33] Berizzi, A., Silvestri, A., Zaninelli, D. & Massucco, S. 1996. IEEE Transactions on Industry Applications. Short-circuit Current Calculations for DC Systems. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel1/28/11488/00536856.pdf?tp=&arnumber=536856&isnumber=11488> [Viitattu 28.6.2006]
- [34] Sutherland, P. E. 1999. IEEE Transactions on Industry Applications, DC Short-circuit Analysis for Systems with Static Sources. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel4/28/15999/00740858.pdf?tp=&arnumber=740858&isnumber=15999> [Viitattu 28.6.2006]
- [35] Partanen, J., Lohjala, J., Kaipia, T., Lassila, J. & Salonen, P. DC ja jakelutekniikka. Lappeenranta University of Technology. Internet:  
[http://www.ee.lut.fi/fi/lab/sahkomarkkina/Partanen\\_dc\\_ja\\_jakelutekniikka.pdf](http://www.ee.lut.fi/fi/lab/sahkomarkkina/Partanen_dc_ja_jakelutekniikka.pdf)  
[16.6.2006]
- [36] Stenius, L. & Erksson, K. 1999. HVDC Light. An excellent tool for City Center Infeed. PowerGen Conference, Singapore, September 1999.
- [37] ABB Tekninen katalogi. SACE Isomax S – Low-Voltage Moulded-Case Circuit-breakers. Internet:  
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/475EF3D72A0A249DC1256CBF003CAD2F/\\$File/ITSCE-604050012.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/475EF3D72A0A249DC1256CBF003CAD2F/$File/ITSCE-604050012.pdf) [Viitattu 29.11.2006]

- [38] General Electric. Tekninen katalogi, Gerapid High Speed Circuit Breakers, 2006. Internet:  
<http://www.geindustrial.com/publibrary/checkout/38652.30055.21286.23252/generic/DEA-379%20Gerapid%20Brochure.pdf> [Viitattu 30.11.2006]
- [39] Häusler, M. 1999. ABB dokumentti, Multiterminal HVDC for High Power Transmission in Europe. Internet:  
<http://search.abb.com/library/ABBLibrary.asp?DocumentID=1JNL100095-589&LanguageCode=en&DocumentPartID=&Action=Launch> [Viitattu 30.11.2006]
- [40] AEG Low Voltage Devices, Products – GERapid 6007 Circuit Breakers. Internet:  
[http://www.aeglettra.it/eng/prodotti/doc/scheda.cfm?pro\\_id=1712&idver=100](http://www.aeglettra.it/eng/prodotti/doc/scheda.cfm?pro_id=1712&idver=100) [Viitattu 30.11.2006]
- [41] Xing, K., Lee, F.C., Lai, J. S., Thandi, G. & Borojevic, D. 1997. Adjustable Speed Drive Neutral Voltage Shift and Grounding Issues in a DC Distributed Power System. USA, IEEE-IAS Conf.. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel3/4939/13803/00643071.pdf?arnumber=643071> [Viitattu 19.6.2006]
- [42] Schaeffer, G. J. SMARTGRIDSworkshop Active Houses at ECN, Energy research Centre of the Netherlands Internet: <http://www.ecn.nl> [Viitattu 27.6.2006]
- [43] Jacobson, B., Fisher de Toledo, P. & Asplund, G. 2006. City Infeed with HVDC Light and Extruded Cables. CEPESI, 16th Conference of the Electric Power Supply Industry, Mumbai, India. 6–10 November 2006. Internet:  
<http://search.abb.com/library/ABBLibrary.asp?DocumentID=9AKK101130D3876&LanguageCode=en&DocumentPartID=&Action=Launch>. [Viitattu 26.5.2007]
- [44] Sharma, R. & Gao, H. IEEE, A New DC-DC Converter for Fuel Cell Powered Distributed Residential Power Generation Systems. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10769/33947/01620662.pdf?tp=&arnumber=1620662&isnumber=33947> [Viitattu 27.6.2006]
- [45] Lee, C., Q., Siri, K. & Wu, T.-F. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. University of Illinois at Chicago, Current Distribution Control for Parallel Connected Converters: Part 1. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7/6492/00256303.pdf?tp=&arnumber=256303&isnumber=6492> [Viitattu 30.6.2006]

- [46] Moussaoui, Z., Batarseh, I., Lee, H. & Kennedy, C. An Overview of the Control Scheme for Distributed Power System. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/3803/11131/00535130.pdf?arnumber=535130>  
 [Viitattu 3.7.2006]
- [47] Jordan, M. 1999. Texas Instruments – Application Note, UC 3907 Load Share IC Simplifies Parallel Power Supply Design. Internet:  
<http://focus.ti.com/lit/an/slua147/slua147.pdf> [Viitattu 3.7.2006]
- [48] Lee, C., Q., Siri, K. & Wu, T.-F. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. University of Illinois at Chicago, Current Distribution Control for Parallel Connected Converters. Part 2. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7/6492/00256304.pdf?isnumber=&arnumber=256304>  
 [Viitattu 3.7.2006]
- [49] Fleischer, K. & Munnings, R. S. 1996. IEEE Transactions on Industry Applications. Power Systems Analysis for Direct Current (DC) Distribution Systems. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel1/28/11488/00536855.pdf?tp=&arnumber=536855&isnumber=11488> [Viitattu 5.7.2006]
- [50] Brenna, M., Tironi, E. & Ubezio, G. 2004. 11th International Conference of Harmonics and Quality of Power. Proposal of a Local DC Distribution Network with Distributed Energy Resources. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9671/30555/01409388.pdf?tp=&arnumber=1409388&isnumber=30555> [Viitattu 6.7.2006]
- [51] Shimizu, T., Yasuhiro, J. & Kimura, G. 2000. Transactions on Industry Applications. DC Ripple Current Reduction on A Single-Phase PWM Voltage-Source Rectifier. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/28/18871/00871292.pdf?tp=&arnumber=871292&isnumber=18871> [Viitattu 6.7.2006]
- [52] Caserda Magro, M., Mariscotti, A. & Pinceti, P. 2006. Definition of Power Quality Indices for DC Low Voltage Distribution Networks. IMTC 2006 – Instrumentation and Measurement Technology Conference, Sorrento, Italy 24–27 April 2006.
- [53] Karlsson, P., Gertmar, L. & Samuelsson, O. 2002. Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. EPE 2005 Conference Proceedings, On DC Injection into AC Grids from Distributed Generation. Internet:  
<http://www.iea.lth.se/~ielper/DistributedPowerSystems/EPE2005LG-paper.pdf>  
 [Viitattu 6.7.2006]

- [54] Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S. & Saari, P. 2003. Energiavarastoinnin nykytila. Espoo, VTT Prosessit. S. 104–105. [Viitattu 7.7.2006]
- [55] European Commission – Research – Sustainable Energy Systems, Distributed Generation – Introduction to Distributed Generation. Internet: [http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn\\_rt/nn\\_rt\\_dg/article\\_1158\\_en.htm#3](http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_dg/article_1158_en.htm#3) [Viitattu 11.7.2006]
- [56] Solar Electric Supply – A Division of Digital Electric Store, USA, California, 2001–2006. Internet: <http://www.solarelectricsupply.com/systems/grid-tie/discount-gridtie.html> [Viitattu 12.7.2006]
- [57] Jaakkola, L., Keskinen, S., Koponen, P., Kumpulainen, L., Kärkkäinen, S., Lehtonen, M., Saari, P., Saaristo, H., Tommila, T., Valkonen, J. & Wahlström, B. 2005. Paikallisten energiaresurssien hallinta hajautetussa energiajärjestelmässä. VTT, Espoo. Internet: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2284.pdf> [Viitattu 13.7.2006]
- [58] Hätönen, H. 2005. Jakeluverkkoon liitettävä energiavarasto sähkön laadun, jakelun luotettavuuden ja energian hallinnassa. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu / VTT, Espoo.
- [59] Ton, M., Fortenbery, B. & Tschudi, W. 2007. DC Power for Improved Data Center Efficiency. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [60] Pang, H., Lo, E. & Pong, B. 2006. DC Electrical Distribution Systems in Building. 2006. 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications. Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4147770/4117905/04147795.pdf?tp=&isnumber=4117905&arnumber=4147795>. [Viitattu 1.6.2007]
- [61] Tschudi, W. & Chen, A. 2006. The Department of Energy’s Lawrence Berkeley National Laboratory, USA. Internet: <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/EETD-DC-power.html> [Viitattu 28.8.2006]
- [62] ABB TTT-käsikirja, 2000/07, luku 18. Sähkömoottorikäytöt. S. 4. Internet: [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/180\\_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/180_0007.pdf) [Viitattu 25.10.2006]

- [63] Karlsson, P. 2003. Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. Small-signal Modeling and Analysis of DC Distributed Power Systems. Internet:  
<http://www.iea.lth.se/~ielper/DistributedPowerSystems/NORPIE2004-paper.pdf>  
[Viitattu 26.10.2006]
- [64] Energiateollisuus, Sähkönkäyttö ja verkostohäviöt – tilastot, 2006. Internet:  
<http://www.energia.fi/page.asp?Section=2770> [Viitattu 14.3.2007]
- [65] Energiamarkkinavirasto, Sähkönjakeluverkon komponenttien yksikköhinnat vuodelle 2007. Internet:  
[http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sahko\\_jakelu\\_yksikkohintataulukko\\_2007.xls](http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sahko_jakelu_yksikkohintataulukko_2007.xls) [Viitattu 14.3.2007]
- [66] Prysmian Cables & Systems, Tuoteluettelot 2007. Internet:  
[http://www.fi.prysmian.com/fi\\_FI/cables\\_systems/energy/product\\_families/index\\_voima\\_fi.jhtml](http://www.fi.prysmian.com/fi_FI/cables_systems/energy/product_families/index_voima_fi.jhtml) [Viitattu 22.3.2007]
- [67] Nilsson, D. & Sannino, A. Efficiency Analysis of Low and Medium Voltage DC Distribution Systems. Chalmers University of Technology, Sweden. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9451/30010/01373299.pdf?arnumber=1373299>  
[Viitattu 26.3.2007]
- [68] Kivisaari, R. Puhelinkeskustelu, Prysmian Cables & Systems. Internet:  
<http://www.prysmian.fi> [Viitattu 27.3.2007]
- [69] Metsäranta, M. Tarjous, sähköposti. Prysmian Cables & Systems. Internet:  
<http://www.prysmian.fi> [Viitattu 27.3.2007]
- [70] Salonen, P. 2006. Tasasähkön hyödyntämismahdollisuudet sähkönjakelussa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto.
- [71] Meyr, C., Kowal, M. & De Doncker, R.W. 2005. Circuit Breaker Concepts for Future High-Power DC-Applications. Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005. Vol. 2, 2–6 Oct. 2005. S. 860– 866.
- [72] Mahajan, N.R. 2004. System Protection for Power Electronic Building Block Based DC Distribution Systems. Dissertation. North Carolina State University. Internet: <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-12052004-233822/unrestricted/etd.pdf>. [Viitattu 12.6.2007]

- [73] An EPRI White paper. DC Power production, Delivery and Utilization. June 2006. Internet:  
[http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/WhitePapers/EPRI\\_DCpower\\_June2006.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/WhitePapers/EPRI_DCpower_June2006.pdf). [Viitattu 18.6.2007]
- [74] Borioili, E., Brenna, M., Faranda, R. & Simioli, G. 2004. A Comparison Between the Electrical Capabilities of the Cables Used in LV AC and DC Power Lines. Italia. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9671/30555/01409390.pdf?tp=&arnumber=1409390&isnumber=30555> [Viitattu 28.8.2006]
- [75] Tang, L. & Ooi, B.-T. Protection of VSC-Multi\_Terminal HVDC against DC-faults. McGill University, Canada. Internet:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7959/22002/01022539.pdf>. [Viitattu 18.6.2007]
- [76] Wei K., Lijun Q. & Yang, Q. 2004. Integrated protection and control, network management – solution for DC traction power supply system. Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference on. Vol. 1, 5–8 April 2004. S. 123–127.





## Liite A: Standardin SFS-EN 50160 määrittelemät sähkön laatuksiteerit [6]

### Taajuuden laatuksiteerit

Hyvä laatu:	50 Hz ± 1%
Normaalilaatu:	50 Hz ± 1%
Standardilaatu:	95 % mittauksista välillä 50 Hz ± 1% ja kaikki 50 Hz + 4% / -6 %. Saareke- tai varavoimakäytössä 95 % välillä 50 Hz ± 2% ja kaikki 50 Hz ± 15 %.
Mittaus:	10 s jaksoina viikon ajan. Mittausjaksoille lasketaan keskiarvo.

### Jännitteen laatuksiteerit

Hyvä laatu:	$U_n \pm 4\%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5\%$ .
Normaalilaatu:	$U_n \pm 10\%$
Standardilaatu:	95 % välillä $U_n \pm 10\%$
Mittaus:	10 min jaksoina viikon ajan

### Nopeiden jännitteen muutosten laatuksiteerit

Hyvä laatu:	$P_{st,3max} \leq 1$ $P_{lt,max} \leq 0,74$
Normaalilaatu:	$P_{lt,max} \leq 1$
Standardilaatu:	95 % mitatuista $P_{lt}$ -arvoista $\leq 0,74$
Mittaus:	Manuaalisesti tai kuvan 9 avulla
Laskenta:	$P_{lt} = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3}{12}}$ <p><math>P_{st}</math> = lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi. Mitataan kymmenen minuutin aikavälein.</p> <p><math>P_{lt}</math> = Pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi. Lasketaan kahdenkymmenen kahden tunnin mittausaikaväliltä saadusta <math>P_{st}</math> -arvosta.</p>

Harmonisten yliaaltojen laatu kriteerit

Hyvä laatu:	THD ≤ 3 %
Normaalilaatu:	THD ≤ 3 %
Standardilaatu:	$U_{nsh} \leq$ taulukon 4.4b arvot ja THD ≤ 6 %
Mittaus:	Tehollisarvot $U_{nsh}$ mitataan 1 tai 5 min jaksoina, joista jälkilaskennalla johdetaan 10 min jaksot viikon ajalle.
Laskenta:	$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}$ <p>THD = harmoninen särö  <math>h</math> = harmonisen järjestysluku  <math>U_h</math> = yksittäisen harmonisen suhteellinen amplitudi verrattuna perustaajuiseen jännitteeseen <math>u_1</math></p>

Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot prosentteina nimellisjännitteestä  $U_n$

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
kolmella jaottomat		kolmella jaolliset			
järjestysluku $h$	suhteellinen jännite	järjestysluku $h$	suhteellinen jännite	järjestysluku $h$	suhteellinen jännite
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

